

前縁褶曲一衝上帯におけるバランス断面の作成

Constructing Balanced Cross-Sections in Foreland Fold-Thrust Belts

D. D. シェリング*
Daniel D. Schelling

Abstract: “Balancing” cross-sections is now an accepted technique among structural geologists for checking the validity of cross-sections in both contractional and extensional terrains. The assumptions behind “balancing” cross-sections, the ground rules for drawing “admissible” cross-sections, and the techniques for “restoring” cross-sections in foreland fold-thrust belts are outlined in order to encourage geologists not familiar with balancing methods to begin balancing their own cross-sections.

はじめに

最近20年の間に、断面を“バランスすること”は構造地質学者や探査地質学者のあいだでは通常の仕事となった。変形断面(deformed-state cross-sections)の“復元”は収縮域および伸長域の両方で断面図の妥当性をチェックする重要な手段と考えられる。さらに、復元断面図(restored-state cross-sections)と変形断面図を比較することによって、あたえられた地域の絶対的および相対的収縮量あるいは伸長量を決定することができる。

バランス断面(balanced cross-sections)は構造地質学の文献ではいまや一般的であるが、多くの地質研究者はバランス断面を作成するテクニックに通じていない。また、断面をバランスするときの仮定、基本ルールおよびテクニックを論じている論文や教科書はほとんどない。そ

れ故に、本論では前縁褶曲一衝上帯(foreland fold-thrust belts)を切る断面をバランスし、復元する方法の概略を述べる。本論が地質断面をバランスする過程の神秘性を取り除くだけでなく、収縮造山帯で仕事をしている地質研究者が自分たちの断面をバランスしはじめる励ましになれば幸いである。

バランス地質断面

地質断面をバランスする考え方やテクニックは、もともとは前縁褶曲一衝上帯やとくに東部カナダロッキー山脈の前縁(frontal)褶曲一衝上帯において発達した。東部カナダロッキー山脈はゆるく後背地へ傾斜する(hinterland-dipping)基底ディタッチメント(basal detachment)あるいはデコルマン(décollement)の上に重なり、褶曲し、断層にきられた非変成堆積岩層序によっ

*北海道大学理学部地質学鉱物学教室(現住所: 840 Park Lane, Boulder, Colorado, 80302 USA)

て特徴づけられる(Bally et al., 1966; Dahlstrom, 1969, 1970; Elliot and Johnson, 1980; Price, 1981; Boyer and Elliot, 1982). 断面をバランスする際の基本的考えは、変形断面が幾何学的に正しいとみなされるためには、それが“許容され(admissible)”かつ“復元できる(restorable)”ものでなければならないということである(Elliot, 1983). “許容”断面(“admissible” cross-section)とはすべての構造が一般に認められている褶曲やスラストのジオメトリーについての規則に従っている地質断面である。“復元”断面(“restorable” cross-section)とは物質が増減することなく、その変形前あるいは構造運動前の状態に“復元され”(“引き戻され”あるいは“押し伸ばされ”)うる地質断面である。復元された変形前の状態の断層の軌跡(trajectories)は、その断面がバランスしているとみなされるためには、幾何学的に正しく(“許容されうる(admissible)”)なければならない。許容断面を描く基本ルールや変形断面を復元する方法を以下に述べる。前縁褶曲—衝上帯における構造ジオメトリーやそれらの地域によくみられる構造のいろいろについての議論に関しては、Dahlstrom (1969, 1970), Elliot and Johnson (1980), Boyer and Elliot (1982), Butler (1982, 1987)やBoyer (1986)を参照すべきである。

断面をバランスするには二つの基本的仮定がある(Dahlstrom, 1969; Hossack, 1979; Elliot and Johnson, 1980; Price, 1981). 第一の仮定は、褶曲や衝上断層によって岩層(rock package)の形は変わるが、その体積は変わらない、ということである。この条件はあきらかに非変成条件のもとでの変形にのみ有効である。しかし、この仮定は緑色岩相の変成条件下で変形した岩石にたいしてもほぼ正しいであろう(Elliot, 1980). 加うるに、伸長堆積盆では堆積物は沈降のあいだ少なくともは圧密(non-trivial compaction)をこうむったかもしれない。したがって、成長断層(growth-faulting)の証拠を示す堆積同時伸長地域においては、累進的な復元では除圧密(de-compaction)を考慮する必要があるだろう(R.

Kligfield 談話, 1990).

第2の仮定は、変形した岩層は面変形のみをこうむり、その二つの有限ひずみ軸は地質断面の面内にある、ということである。いいかえると、第3の次元、つまり断面の面内に含まれない次元での変形は重要ではないということである。この仮定が有効であるためには、断面線がテクトニックな短縮あるいは運動の方向にほぼ平行($\pm 10^\circ$ 以内)でなければならない。さらに、短縮(あるいは伸長)方向が異なる2回以上の変形作用をこうむった地域では、最後の変形時に形成された構造についてのみ復元することが重要である。変形地域をそれらの構造運動前のジオメトリーに復元するには新しいことから古いことへ順番にすべきである。

バランス地質断面の作成

断面線の選択

正確なバランス断面を描くためには、上に述べたように、断面線は短縮(あるいは伸長)の方向および運動方向にほぼ平行でなければならない。したがって、断面線を慎重に選ぶ必要がある。断面線を選択する一般的方法是二つある。第一に、対象地域が円筒状褶曲で特徴づけられる場合には、褶曲軸は短縮方向に垂直であると一般に考えられる。したがって、断面線および断面は円筒状褶曲軸に垂直に引くことができる。このことはしばしばその断面は垂直でないことを意味する。

しかし、前縁褶曲—衝上帯における褶曲軸は下にあるスラストの走向に概してサブパラレルであるので、一部では(たとえば、斜交ランプの上では)、褶曲軸は短縮方向に垂直ではないかもしれない。さらに、褶曲軸は問題の地域では円筒状ではないかもしれない。この場合には、Elliot (1980)の“弓と矢(bow and arrow)”の法則を使うことができる。スラストはよく側方と上下方の両方へ消滅し、断層は“ティップ・ライン(tip line)”(Boyer and Elliot, 1982)で終わる。地質図では大きいスラストはしばしばが侵

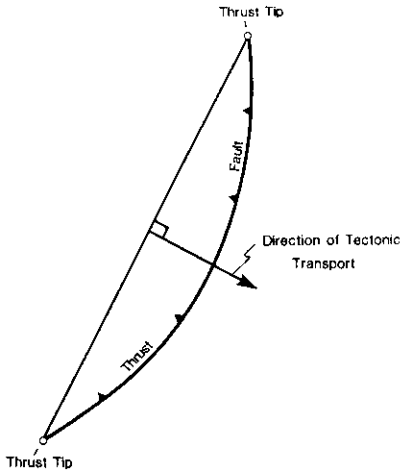


Fig. 1 Determining the direction of tectonic transport and shortening by the "bow and arrow" rule of Elliot (1980). The direction of tectonic transport is perpendicular to a line which connects the two exposures of a thrust "tip-line" in map view, and is in the direction from the tip-connector to the fault.

食面と交わる点を二つもつ(Fig. 1)。“弓と矢”の法則によれば、短縮方向はティップ・ラインが侵食面と交わったこの二つの点を結んだ直線に垂直であり、構造運動の方向はティップ・ラインを結んだ線から衝上断層へむかっている(Fig. 1)。

予備的な変形断面の作成

断面がバランスしていると見なされるためには、断面は“許容されるもの”でなければならない。そして、その変形断面は褶曲-衝上帯ジオメトリーについて一般に認められた規則に従っていないなければならない。したがって、予備的な変形断面をつくるときには、これらの規則を心にとめることは賢明なことである。これらの経験的“規則”については、Dahlstrom (1969, 1970), Elliot and Johnson (1980) や Boyer and Elliot (1982) が詳細に議論している。以下では簡単に述べる。



Fig. 2 "Stair-case" or "ramp-flat" geometry of a thrust fault. The "flats" are those sections of the thrust fault where the fault-surface is approximately parallel to bedding surfaces, while the "ramps" are those sections where the fault-surface is oblique to bedding surfaces. Where a thrust fault has a hangingwall flat, as in this figure, the hangingwall bedding orientations are parallel to the underlying thrust fault.

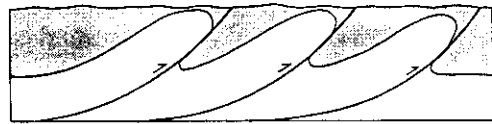


Fig. 3 "Listric" thrust fault trajectories in an imbricate fan.

a) スラストは初期には運動の方向へ水平基準面よりも上の部分を切る。したがって、堆積物が変形前にほぼ水平で(flat-lying)あった地域では、スラストは運動の方向へ上部層を切る。この場合、スラストが後背地(運動方向の反対)へむかって傾斜している場合には、スラストの傾斜は下盤と上盤のそれぞれの層面の傾斜よりも大きい、同じだろう。

b) スラストは一般に“階段状”(“ランプ-フラット(ramp-flat)”)の形態をなし、インコンピテントな岩石(例えば、頁岩や蒸発岩)内では層理にほぼ平行で、コンピテントな岩石(例えば、砂岩や炭酸塩岩)では層理に斜交する(Fig. 2)。あるいは初期にはスラストは“リストリック(listric)” (“シャベル型”)形態をしめす(Fig. 3)。

c) 初期においては、侵食面下2, 3 kmではスラスト面と層理面との鋭角(“断層-層理交角”)は35°を越えることはほとんどない(Elliot, 1980)。しかし、侵食面から数 km 以内では、スラストはその初期に60°位に傾斜しうる。堆積岩層内において、層理に平行なフレキシユラル・スリップや単純純断ひずみが本来の断層-

層理交角を変えることはありうる。しかし、可能などころでは野外で断層—層理交角を測り、予備的な変形断面を作成するときそれぞれの岩層準でのその角度を利用することは有用である。

d) 収縮造山帯(例えば、前縁褶曲—衝上帯)では、もし後の伸長断層がなかったならば(ロールオーバー断層(roll over faults)におけるように)、各層準は常にそれらの構造運動前のもとの“広域基準高度(regional elevations)”のレベル、あるいはそれらより上に位置している(Fig. 4)。ある層準の広域レベルは必ずしも水平である必要はないし、しばしば後背地へ傾いている。

e) 個々のスラストにそう変位量は一般にどこでも同じか、上方へ(侵食面の方へ)小さくなる(スラストにそう変位量の決定については後の距離復元の節をみよ)。スラストにそう運動量の減少は褶曲の振幅の増加によって相殺される；短縮量は(必ずしも厳密ではないが)、あたえられたスラストで隔てられていても、スラストの上でも、すべての地層境界面にそってほぼ同じであるはずである(Fig. 5)。そうでない場合には、スラストは上方で分かれて、一連のスプレイ・スラスト(splay thrusts)になる。この規則はデュプレクス(duplex)構造には適用されない；デュプレクスのルーフ・スラスト(roof thrust)の先端部分は一般に、下にある個々の分岐した(anastomosing)スプレイ・スラストよりもおきな全衝上運動量を吸収している。

f) 特別な場合をのぞいて、スラストによっては地層欠除や地層薄化あるいは新しい地層の古い地層上への衝上は起こらない(Dahlstrom, 1970)。このことが正しくない場合の例が“ブリーチ断層(breach-faulting)”である。その場合、後期のスラストが既に形成されていたスラストを切り、構造単位が再逆転したり、若い地層群が古い地層群の上へ衝上したりする(Fig. 6)。傾斜不整合に一致するデコルマンにそう滑りもまた若い地層群の古い地層群への衝上と解釈される(Dahlstrom, 1970)。



Fig. 4 Relationship between stratigraphic “regional elevations” and final, post-tectonic elevations in fold-thrust belts. In contractional terrains horizontal datum are shortened, stratigraphy may be repeated in vertical section, and stratigraphic horizons always lie at or above an original, pre-tectonic “regional elevation”.

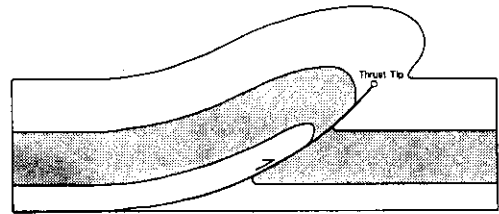


Fig. 5 Listric fault “dying-out” up-dip into a fold. Displacement along the fault progressively decreases up-dip. The “thrust tip” is the location at which motion along the thrust fault has reached zero. Shortening accommodated by a combination of folding and thrusting below the thrust-tip is accommodated by only folding above the thrust tip.

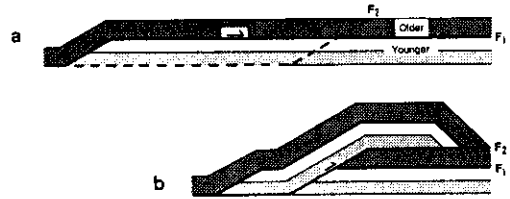


Fig. 6 “Breach thrust” causing the re-inversion of tectonic units. In (a) older beds have been thrust over younger beds along F_1 . The location of the incipient later fault, F_2 , is shown in (a). Motion along fault F_2 has offset the inactive F_1 fault in (b) and thrust younger beds over older beds.

g) すべての上盤フラットや上盤ランプにはそれらに対応する下盤フラットや下盤ランプがあるべきであり、その逆もそうである。対応する上盤および下盤のランプの長さや断層—層理

交角はバランスしていると考えられる断面に対して同じである必要はない(Rowan and Ratliff, 1988)が、それらは似ているべきである。

h) 断面に描かれたすべての構造はなるべくなら、野外において観察されうるべきである。このことは多くの地域で悪い露頭条件のために必ずしも可能ではない、それ故、断面にみられる構造は同じあるいは類似の衝上帯のほかの場所で類似のものが観察されるべきである。

キंक褶曲ジオメトリーを使った地質断面の作成

多くの褶曲—衝上帯には“キंक”あるいは“傾斜ドメイン(dip-domain)”ジオメトリーをしめす褶曲がみられる(例えば, Dahlstrom, 1970; Suppe, 1983; Boyer, 1986をみよ)。対象地域にシャープな角ばったヒンジによって分割された直線状の翼部からなるキंक褶曲がみられようと、あるいは連続した曲線をもつ、より丸みをおびた“バスケット”様式のジオメトリーをしめす褶曲がみられようと、キंक褶曲ジオメトリーの概念を使って地質断面を描く方法を理解することは役にたつ。地表や地下の褶曲ジオメトリーに基づいて、地下の断層ジオメトリーを予想する方法を理解することも重要である。断層ジオメトリーと上盤の“断層屈曲(fault-bend)”褶曲ジオメトリーとの関係についてはSuppe(1983)が詳細に議論している。

キंक褶曲による断面はつぎのようにして作る(Fig. 7)：地層傾斜のデータを断面上におとし、傾斜がほぼ等しい“傾斜ドメイン”(対象地域や岩石種により、 5° ~ 20° 以内)に分割する。例えば、Fig. 7ではドメイン1は地層が北へ約 30° 傾斜する地域；ドメイン2では地層はほぼ水平である；等々。地層の傾斜は断面上に褶曲軸にそって投影しなければならない。また、地層の走向が断面線に垂直でないときは、見かけの傾斜をおとす。つぎに各ドメインの平均傾斜を計算する(Fig. 7)；ドメイン1では北へ 30° 、ドメイン2では 0° 、ドメイン3では南へ

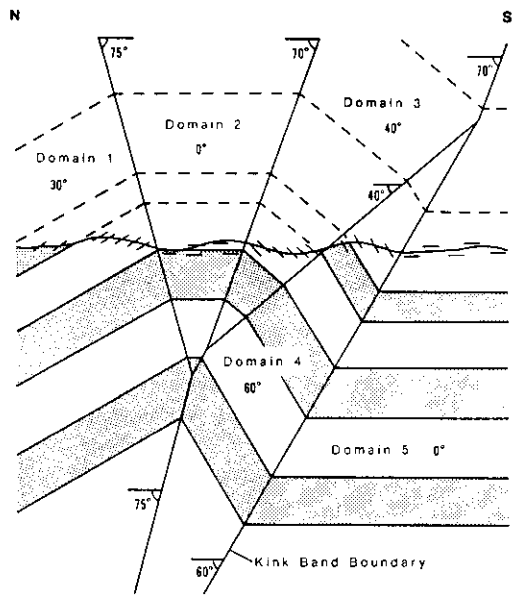


Fig. 7 Construction of a cross-section through a kink-fold. Apparent-dips are plotted as short, straight lines along the erosion surfaces. See text for explanation.

40° 等々。それから傾斜ドメインあるいは“キंकバンド”を隣接するキंकバンドの層面どうしの交角の二等分線である“キंकバンド境界”(褶曲軸面あるいはキंक褶曲ヒンジ)によって区切る。Fig. 7ではドメイン1と2の間のキंकバンド境界は南へ 75° 傾斜している、いっぽう、ドメイン2と3の間では北へ 70° 傾斜している。キंकバンド境界は侵食面の上にも下にも描き入れる。二つのキंकバンド境界がぶつかったときには、そこから新しいキंकバンド境界を、新たに接することになった二つのキंकバンドの層面どうしの交角を二等分するようにひく。Fig. 7では、侵食面下だけに存在するドメイン1と4の間のキंकバンド境界は北へ 75° 傾斜している。堆積境界(および断層面)を書き込む。層理の傾斜はキंकバンド内では変わらず、キंकバンド境界を横切るときのみ変化する(Fig. 7)。もしキंकバンド境界が層面交角を二等分していないと、層厚はその境界をはさんで変化するだろう。

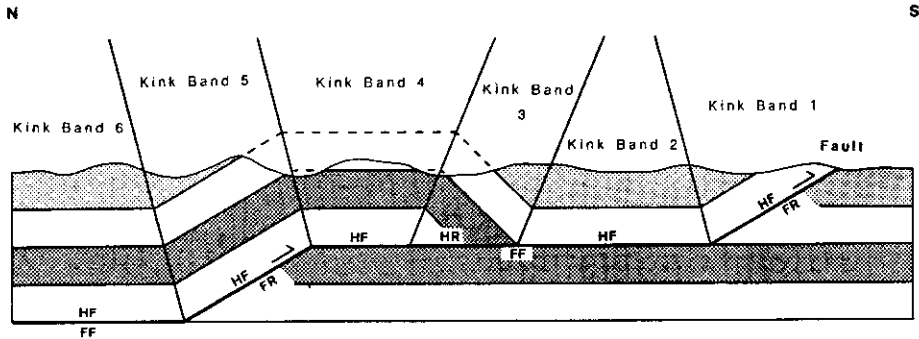


Fig. 8 Using fold geometry to determine possible underlying thrust-fault geometry. See text for explanation. HF = hangingwall-flat; HR = hangingwall-ramp; FF = footwall-flat; FR = footwall-ramp.

Fig. 8では、キंक褶曲ジオメトリーが、ほかの場所では地表に露出しているが、ここでは地下にあるスラストのジオメトリーを推定するのに使われている。キंकバンド1では上盤フラット (hangingwall-flat: HF) が下盤ランプ (footwall-ramp: FR) の上にくる“フラット・オン・ランプ (flat-on-ramp)” スラストジオメトリーの結果、北へ30°傾斜している。キंकバンド2でのほぼ水平な傾斜は、上盤フラット (hangingwall-flat: HF) が下盤フラット (footwall-flat: FF) の上にくる“フラット・オン・フラット (flat-on-flat)” スラストジオメトリーの結果と解釈される。キंकバンド3における南への傾斜は“ランプ・オン・フラット (ramp-on-flat)” ジオメトリー、キंकバンド4の水平傾斜は“フラット・オン・フラット (flat-on-flat)” ジオメトリー、キंकバンド5の北への傾斜はフラット・オン・ランプ (flat-on-ramp) ジオメトリー、そしてキंकバンド6の水平傾斜は“フラット・オン・フラット (flat-on-flat)” ジオメトリーに起因すると解釈される。キंकバンド3の上盤ランプはキंकバンド5の下の下盤ランプに対応する。Fig. 8の背斜は、キंकバンド3を褶曲の前方翼、キंकバンド4を冠、そしてキंकバンド6を後方翼とする“断層屈曲 (fault-bend)” 背斜と解釈される。褶曲ジオメトリーは下にあるスラ

ストジオメトリーに起因すると解釈される(すなわち、地表にみられるすべての褶曲は断層屈曲褶曲である)ので、キंकバンド境界やキंक褶曲は下にあるスラストへのみ投影されることに注意しなければならない。

与えられた地域を切るほとんどの褶曲ジオメトリーを説明する下位のスラストジオメトリーはいくつかが可能である。しかし、どの解釈がもっとももっともらしいかを決定することは、上に述べた褶曲—スラストジオメトリーの規則や対象地域の既知の地質の相互関係を使うことによって、また断面を復元することによって、一般には可能である。

“ピンライン”位置の選択

ピン・ライン (pin-line) は変形断面内の線で、すべての復元の測定はそこが起点となる。理想的には、ピン・ラインは変形の前も後も層理に垂直であるので、ピン・ラインは層内すべりがほとんどあるいはまったくない地域の層理に垂直に引くべきである。ピン・ラインには“広域”ピン・ラインと“局地”ピン・ラインの二つがある。“広域”ピン・ラインとは非変形の前縁堆積盆に打たれたピン・ラインで、衝上帯の大きな断面を復元するのに自信をもって使用できる。Figs. 10, 11および14では“広域”ピン・

ラインが断面を復元するのに使われている。

“局地”ピン・ラインは褶曲—衝上帯そのもののなかに打たれたピン・ラインであり、以下のようなところに設定することが可能である (Fig. 9) :

- (i) 正立褶曲の冠あるいは底にそって;
- (ii) 地層がほぼ水平なキンクバンド内に;
- (iii) “三角形帯”あるいは“ポップ・アップ・ブロック (pop-up-block)” のような対称な構造のなかに;
- (iv) 非対称褶曲の後方翼の上に;
- (v) 褶曲ヒンジ面あるいはキンクバンド境界にそって。

褶曲ヒンジ面あるいはキンクバンド境界にそって打ったピン・ラインは変形断面内の層理に垂直でないかも知れないことに注意すべきである。すべての“局地”ピン・ライン、とくに非対称褶曲の後方翼の上やキンクバンド境界にそって打たれたものは慎重に利用すべきであり、“局地”ピン・ラインによる復元は“長い”距離(多くのスラストをふくむ変形断面の部分)にわたる復元には使用すべきでない。これは、復元中に生じてくる問題(例えば、復元断面での不自然なスラスト軌跡)がピン・ラインからの距離が大きくなるにしたがって増大してくるからである; 本来層理に斜交し、変形前に層理に垂直であったと思われるピン・ラインからの復元は正しいかもしれないが、不合理にみえる断層軌跡をもたらすだろう。

ひとつのスラストを基準として変形断面の一部を復元することも可能である。この場合、そのスラストは層面に斜交する湾曲したピン・ラインとなる。スラストから復元するときには、初期の断層の形態(例えば、すべての岩相における変形前の断層—層理交角)を合理的に確かめるべきである。この場合の復元は仮定した変形前の断層軌跡からおこなう。

復元テンプレートの作成

復元の実際の仕事にはいる前に、復元“テンプレート(template)”を描かなければならない。

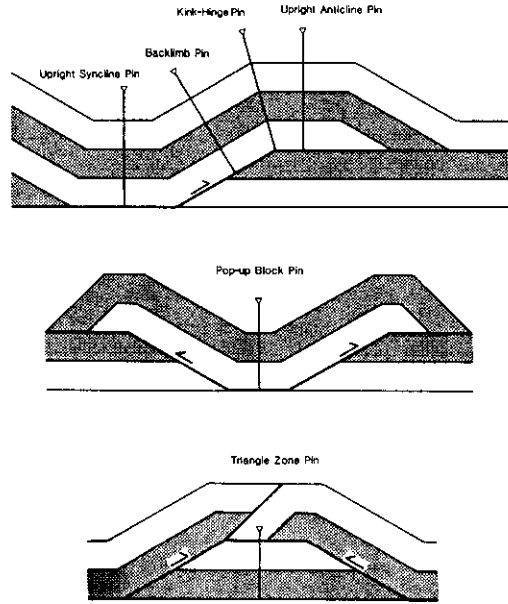


Fig. 9 Possible “local pin-line” locations within a fold-thrust belt.

復元テンプレートは変形断面にみられる岩石の予想される変形前の形態を示す。変形断面の復元は復元テンプレートの上でおこなう。復元テンプレートには層厚の変化、不整合および復元しようとする変形運動の前に存在したと考えられるどんな構造をも取り入れられるべきである。層厚が変形によって変化したあるいは変化したと考えられる地域では、変形前の層厚を決定し、“面復元(area-restoration)”のために復元テンプレートに含めなければならない。

断面の復元

断面の“復元”は實際上、収縮地域における断面の“引き戻し(pulling-back)”や伸長地域における“押しつけ(push-forward)”の仕事である。復元は復元テンプレートの上でピン・ラインから後背へむかって、順番におこなう。

復元には、“距離復元 (line-length restoration)” (湾曲層 (sinuous-bed) 復元としても知られている)と“面復元 (area restoration)”

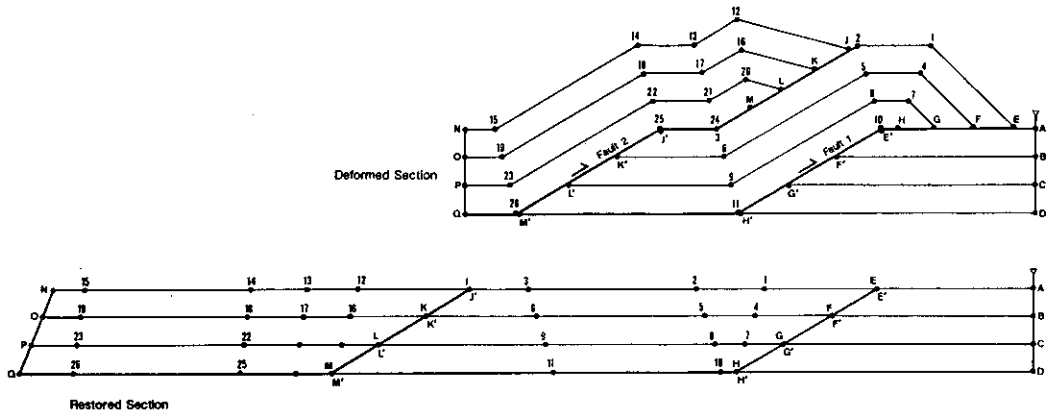


Fig.10 “Line-length” restoration of a cross-section. See text for explanation.

の二つが一般に使われ、距離復元および面復元による断面のバラシングはそれぞれ“距離バラシング(line-length balancing)”, “面バラシング(area balancing)”と呼ばれる。

距離復元(Fig. 10)：距離復元は断面のどの層準にも変形による層厚の変化がなかったと予想されるときに使われる。ピン・ラインを始点として変形断面中の各層面にそって最初に出会うスラストまでの距離を測る。それから変形前の断層軌跡を決定するために、それらと同じ距離をピン・ラインから回復テンプレート上の変形前の層面にそってとる。Fig. 10において、距離A-E', B-F', C-G'およびD-H'は変形断面で測り、復元テンプレートに移して、断層1 (fault 1)の変形前の形を決定した(この場合、断層1の変形前後の形は同じである)。次の手順は、上盤と下盤の“カット・オフ(cut-offs)”, すなわち、あたえられた断層の上盤と下盤の断層面と地層面の交線によって示された線、を合わせることによって、断層1の上盤の地層をそれらの変形前の位置に復元することである。Fig.10において、カット・オフEはE', FはF', GはG' またHはH'に引き戻される。つぎに変形断面の断層1から断層2までの距離を各層面にそって測り、それらの距離を再び復元テンプレートに移し、断層2の変形前の形を決める。Fig. 10

において、線E-1-2-3-J', F-4-5-6-K', G-7-8-9-L'およびH-10-11-M'にそう距離を変形断面で測り、断層2の変形前の位置と形を描くためにそれらを復元テンプレートに移す。断層1にそって測ったEからHまでの距離は断層1の上盤ランプに相当し、いっぽう、断層1にそって測ったH'からM'までの距離は断層1の下盤フラットに相当することに注意。

この手順を断面の終わりまで繰り返す。Fig. 10では上盤の断層一層理カット・オフ線であるJ, K, LおよびMはそれぞれに対応する下盤の断層一層理カット・オフ線J', K', L'およびJ'に復元している。変形断面の線J-12-13-14-15-N, K-16-17-18-19-O, L-20-21-22-23-PおよびM-24-25-26-Qにそって長さを測り、それらを復元テンプレートにとって、断面の末端での線NOPQの形を決める。線NOPQは変形断面では層理に垂直であるが、復元断面では層理に垂直でないことに注意。この線はこの地点での層理にそって生じた単純剪断の量をあらわす“ルース・ライン(loose-line)”と考えてよい(ルース・ラインとその用法については後で述べる)。

スラストにそう変位は、断層面にそって対応する下盤と上盤のカット・オフ線間の距離を測ることにより算出できる。断層1にそう衝上運動は距離H'-10-H, G'-10-G, F'-10-Fあるいは

はE'-10-Eとして測られる。これらの距離はこの断面で必ずしもすべて同じわけではないし、また断面がバランスしているとみなされるために必要であるわけでもない。しかし、スラストにそう運動は同じままか、あるいは上方へ減少する。

面積復元：面積復元は変形により層厚が変化すると予想される地域で使用される。面積バランスが有効であるためには、これらの層厚の変化は断面内での面ひずみの結果でなければならない；層厚の変化が変形の間物質が断面から出入りしたためであってはならない。もし層厚変化が断面内の面ひずみの結果であり、変形時に全体的な体積の増減がなかったならば、変形断面にみられるどの岩石単位の断面面積も変形の間に変化しなかったということは当然である。しかし、長さ(例えば、特定の層面にそって測られた与えられたスラスト間の距離)は変化したかもしれない。したがって、層厚変化が生じたこれらの状況では、長さではなく、地層の面積を復元のために測る。

Fig. 11に、ルーフ・スラスト(roof-thrust)が上に、フロア・スラスト(floor-thrust)が下にある二つの“ホース(horses)”からなる“デュ-

プレクス(duplex)”構造をしめす。ホース1の地層は一樣に30%厚くなり、ホース2の地層は一樣に50%厚くなっている。フロア・スラスト・ランプE'-F'-G'-H'は上に述べた距離復元テクニックを使って、復元断面の復元テンプレート上に引いた。ホース1を復元するために、上と下の地層境界とスラストに囲まれた各地層(エリア1, 2および3)が占めている面積を、それらを一連の三角形と平行四辺形に分割して計算する。エリア1の面積は変形断面でも復元断面でも同じでなければならないので、復元テンプレート上の長さE'-J'とF'-K'は(エリア1の面積/ t_0)に等しい。ここで t_0 は本来の層厚である。復元断面内のG'-L'やH'-M'の長さも変形断面のエリア2と3の面積を使って同様に計算する。ホース2の地層についてもエリア4, 5および6を使って、同じ手順で長さJ'-N, K'-O, L'-PおよびM'-Qを決定し、復元する。

一つの層がヒンジで厚くなり翼で薄くなるというように、ダクタイトな厚化と薄化の両方をこむったところでも、同じ方法で変形状態の層序単位の面積から地層のもとの長さを計算することができる。地層の上下の境界は復元断面において同じ長さである必要はない；変形断面と復元断面とで保持される必要があるのは面

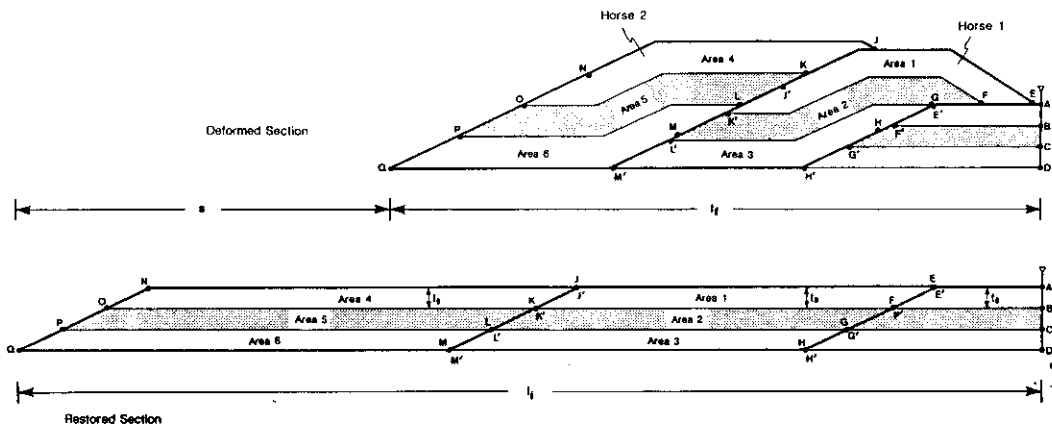


Fig.11 “Area” restoration of a duplex. t_0 = original, pre-tectonic thickness of the beds; l_i = initial length of line Q-D; l_f = final length of line Q-D; s = amount of shortening undergone by line Q-D. See text for explanation.

積のみである。

短縮量と上昇量を使ったディタッチメント深度の決定

もし地層がこうむった短縮量と褶曲・衝上変形の結果としての上昇量の両方がわかるならば、基盤ディタッチメントあるいはデコルマンまでの深さの計算が可能である(Fig. 12)。これは、 $d=A/s$ の関係式でできる。ここで、 d はディタッチメントまでの深さ、 A は変形前の広域基準線(Fig. 12の線 $x-x'$)より上に上昇した部分の面積、また s はスラスト体がこうむった短縮量である。これと同じ関係は広域的デコルマン上で褶曲列(fold-train)ジオメトリをしめす前縁盆地内におけるディタッチメント深度を決めるのに使うことができる。

断面のチェックと変更

復元の仕事が終わったら、その復元断面が“許容される”ことを確かめる必要がある。復元

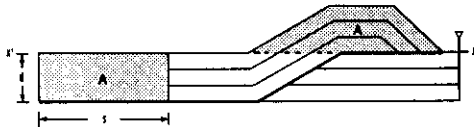


Fig.12 Relationships between the area, A, uplifted above a regional elevation (line $x-x'$), horizontal shortening, s , and the depth to detachment, d . The depth to detachment is calculated using the formula $d = A/s$.

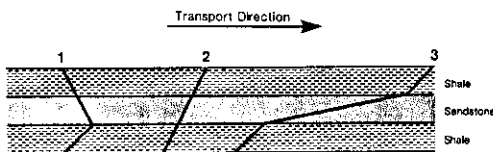


Fig.13 Unrealistic and problematic fault trajectories in a restored section. Fault "1" changes its dip direction, fault "2" dips too steeply towards the hinterland, and fault "3" shows steeper thrust-ramps in shales than in a sandstone.

断面での断層の方向や軌跡は現実的で、矛盾のないものでなければならない。例えば、スラストは変形当時の侵食面の下数 km では約 35° 以上傾斜すべきではない、またスラストの傾斜方向は変わってはいけない(Fig. 13)。断層-層理交角も与えられた岩相や既知のコンピテンシーに対して妥当なものでなければならない(Fig. 13)；スラスト・フラット(断層-層理交角は 0° にちかいは比較的インコンピテントな岩石(例えば、頁岩や蒸発岩)内にあるはずであるし、急なスラスト・ランプ(断層-層理交角は 20° 以上)はよりコンピテントな岩石(例えば、砂岩、石灰岩やドロマイト)内にあるべきである。さらに、異なる断層にそう断層-層理交角はひとつの層準内では完全に一致しているべきである。

きわめて運がよければ、一回目の復元断面が許容されるものとなり、その断面はバランスしているとみなされるかもしれない。しかし、多くの場合、復元断面にいろいろ問題がある。その場合、復元断面が許容されるものになるように、変形断面を変更する必要がある。十分にバランスした断面を作り上げるには変更と復元を何回も繰り返す必要がある。変形断面を変更するときには、行われた何らかの変化は変更した断面の後背地側のすべての復元ジオメトリを変更するので、常に断面の前縁地(ピン・ライン)側から後背地にむかって作業をすべきである。

侵食面の描き入れ

断面のバランスが終わると、復元断面に現在の侵食面を書き入れるのが一般的な習慣である。復元断面に侵食面を描き入れるということは、復元断面内のどこに現在岩石が存在し、どこが侵食されたかをわからせるのみならず、復元断面の有効性の別のチェック機能でもある。

Fig. 14はインブリケート・ファン(imbricate fan)を切る変形断面とその復元断面である。復元断面の侵食面は以下のようにして描いている

前縁褶曲-衝上帯におけるバランス断面の作成

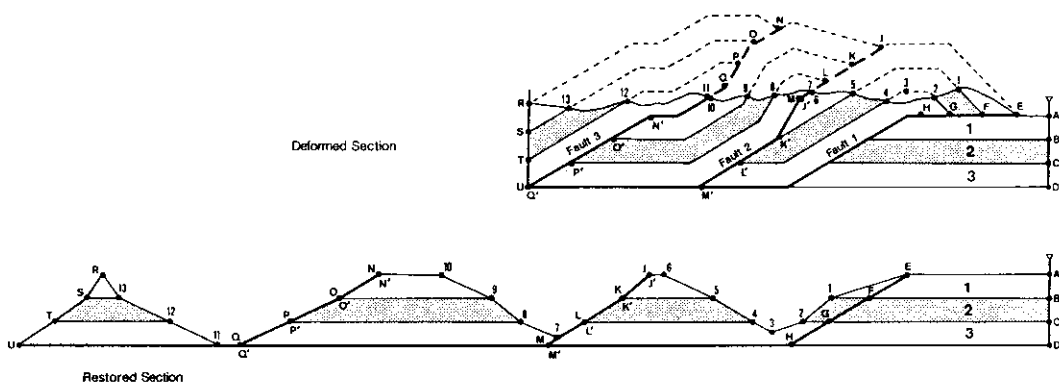


Fig.14 Drawing in the present-day erosion surface on a restored-state cross-section.

See text for explanation.

：変形断面において、各地層境界ぞいにスラストから侵食面までの距離を測る。その距離を復元断面上にとり、侵食面と地層面の交線の位置を決定する。これを、変形断面の地層面あるいは断層面と侵食面が交わっているそれぞれの位置について行う。例えば、Fig. 14では点Eは地層1の上面と侵食面および断層1の両方との交線に一致する。断層1の上盤では、地層1と2の境界面は2ヶ所(地点1と5)で侵食面と交わる。変形断面での距離F-1を測り、復元断面の地点1の位置を決める。同様に、変形断面の距離K'-5を測り、復元断面の地点5の位置を決める。すべての断層面-侵食面および地層面-侵食面の交線をプロットし、それらの点を結ぶと侵食面が描き上がる。

ルース・ライン

“ルース・ライン(loose-line)”とは、地層に斜めあるいは垂直なかつピン・ラインではない、変形断面あるいは復元断面に引かれた何らかの線である。Figs. 10, 11および14の断面の後背地側境界はすべてルース・ラインの例である。変形断面あるいは復元断面のいずれかにおいて地層に垂直に引かれたルース・ラインは、岩体の変形の間にかつむったフレキシユラルな層平行スリップ(bedding-parallel slip)(単純剪

断)の量を推定するのに使うことができる。例えば、Fig. 10の線NOPQは断面の後背地側の境界であるが、復元断面と変形断面のあいだで後背地側(ピン・ラインから遠ざかる方)へ23°回転している。

Fig. 10の線NOPQは局地的なピン・ラインとしてよい候補のようにみえるが、実際には、変形前には地層に垂直ではなかったことに注意すべきである。したがって、この線を基準にして復元したすべての断層は復元断面においてそれらの実際の初期の傾斜よりも後背地側へ23°急に傾いているように見える。

テクトニックな短縮量の計算

断面をバランスしてしまうと、断面に含まれている地域の水平なテクトニックな短縮量を計算するのは簡単な手順である(Hossack, 1979)。ピン・ラインと断面の後背地側の何らかの基準(例えば、断層面と侵食面の交線、断層面と地層面の交線あるいは地層面と断面境界との交線)との間の水平距離を変形断面と復元断面の両方で測る。例えば、Fig. 11で水平距離Q-Dを変形断面と復元断面の両方で測る。この断面での全短縮量(s)はこの2点間の始めの距離(l_1)から終わりの距離(l_2)を引いたものに等しい。つまり、 $s=l_1-l_2$ である。短縮率(s%)

は $s\% = [(l_1 - l_0)/l_0] \times 100$ の関係から計算できる。褶曲一衝上帯では一般に40%から65%の短縮率がみられる。単純剪断変形の結果として、短縮はそれぞれの測定では同じかもしれないが、各地層ぞいには必ずしも同じではないことに注意すべきである。

結論

断面を復元し、バランスすることの目的はあたえられた地域を切る幾何学的に現実的な断面を作ることにある。あるバランス断面は必ずしも唯一の解であるわけではなく、また必ずしも地質学的に正しい断面であるわけでもない。あたえられた地域の同じ断面線にそうバランス断面が一つ以上描けることがしばしば可能である。しかし、バランス断面は幾何学的に現実的な解釈であり、復元が幾何学的にありそうもないことがわかる断面よりもすぐれたものである。もし時間があるならば、いくつかのいろいろな解釈の断面を復元すると役にたつだろう。もちろん、断面を作るのに地震やボーリングのデータは役にたつが、バランス断面を作る上で地表下のデータは必ずしも必要ではない。

可能ならば、一連のバランス断面(“連続”バランス断面)をつくと有用である。隣接するバランス断面のあいだの矛盾は構造解釈上の問題点を見だし、はっきりさせ、それらを正すのに助けとなる。隣接する断面において、二つの対応する基準線(例えば、二つのスラスト)間の一つの層準にそう短縮は、それらの断面が裂け断層(tear fault)で隔てられているのでなければ、同じであるはずである。

もちろん、有限ひずみデータは層厚変化や単純剪断の決定の際助けとなるので、バランス断面を作成するのに役にたつ。断面に有限ひずみデータを含めることを望む人もいる(Woodward et al., 1986をみよ)。

最後に、バランス断面は構造的解釈である(すべての断面のように)ので、自分の仮定や解釈を読者に明確にするために、断面に注釈をつけることはよい考えである。注釈つきの断面の例

は Elliot and Johnson (1980) や Boyer and Elliot (1982) の中にみられる。

断面をバランスすることは時間のかかることであるが、その方法は実際上ごく簡単なことである。断面をバランスするテクニックを概述したこの小論が、よりおおくの地質研究者が自分たちの断面をバランスするように励ますことになれば幸いである。

謝辞 本論は著者が日本学術振興会のポストドクトラル・フェロー(PDF)として北海道大学に滞在中に執筆した。北海道大学の在田一則博士および島根大学の徳岡隆夫博士はそれぞれの大学でバランス断面の作成について講義をする機会をあたえてくださった。在田一則博士はまた本論について有益な助言をくださった。

(訳：在田一則)

文献

- Bally, A. W., Gordy, P. L., and Stewart, G. A., 1966, Structure, seismic data, and orogenic evolution of southern Canadian Rocky Mountains. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, v.14, 337-381.
- Boyer, S., 1986, Styles of folding within thrust sheets: examples from the Appalachian and Rocky Mountains of the USA and Canada. *Jour. Struct. Geol.*, v.8, 325-339.
- Boyer, S. and Elliot, D., 1982, Thrust systems. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, v.66, 1196-1230.
- Butler, R. W. H., 1982, The terminology of structures in thrust belts. *Jour. Struct. Geol.*, v.4, 239-245.
- Butler, R. W. H., 1987, Thrust sequences. *Jour. Geol. Soc. London*, v.44, 619-634.
- Dahlstrom, C., 1969, Balanced cross-sections. *Can. Jour. Earth Sci.*, v.6, 743-757.
- Dahlstrom, C., 1970, Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky

- Mountains. Bull. Can. Pet. Geol., v.18, 332-406.
- Elliot, D., 1980, Balanced cross-section, the methods and programs. Unpublished manuscript.
- Elliot, D., 1983, The construction of balanced cross-sections. Jour. Struct. Geol., v.5, 101-115.
- Elliot, D. and Johnson, M. R. W., 1980, Structural evolution in the northern part of the Moine thrust belt of NW Scotland. Trans. Royal Soc. Edinburgh, Earth Sci., v.71B, 69-96.
- Hossack, J., 1979, The use of balanced cross-section in the calculation of orogenic contraction: a review. Jour. Geol. Soc. London, v.136, 705-711.
- Price, R. A., 1981, The Cordilleran foreland thrust and fold belt in the southern Canadian Rocky Mountains. In Coward, M. P. and McKelvey, K. R., eds., Thrust and Nappe Tectonics, Spec. Pub. Geol. Soc. London, no.9, 427-448.
- Rowan, M. G. and Ratliff, R. A., 1988, Use of fault cut-offs and bed travel distance in balanced cross-sections: Discussion I. Jour. Struct. Geol., v.10, 311-312.
- Suppe, J., 1983, Geometry and kinematics of fault-bend folding. Am. Jour. Sci., v.283, 684-721.
- Woodward, N. B., Gray, D. R. and Spears, D. B., 1986, Including strain data in balanced cross-sections. Jour. Struct. Geol., v.8, 313-324.