

ナップテクトニクス

Balanced cross-section と Moine thrust zone

Nappe Tectonics - Balanced cross-section and Moine thrust zone -

村田明広*

Akihiro Murata

はじめに

スコットランドのカレドニア造山帯の Moine thrust zone (MTZ) は Peach et al. (1907) によって地質構造が体系的に明らかにされて以来、世界で最も研究された衝上断層帯のひとつである。MTZ に関する研究は 1970 年代までに数多くあったが、Elliott & Johnson (1980) は Balanced cross-section (BCS) の考えを導入して、複雑な MTZ の再検討を行った。これは、衝上断層帯の幾何学とその形成メカニズムは、変形前の状態に戻ることができるかどうかを、あらゆる変形の段階で確認することによって、正しく理解されるということによる (Dahlstrom, 1969)。彼らは BCS の作成によって、後に述べる duplex を認定し、衝上断層群の形成順序について従来と異なる考えを出した。この論文は MTZ の研究者たちに大きなインパクトを与え、その後主に Coward や Butler によって BCS の考えを導入した研究が行われた。

ここでは BCS と duplex について概説した後、MTZ のナップテクトニクスの研究の中で、BCS の作成がどのような貢献をしたかについて概観する。また、紙数の関係で図を多く載せることができないので、それぞれの文献を参照していただきたい。

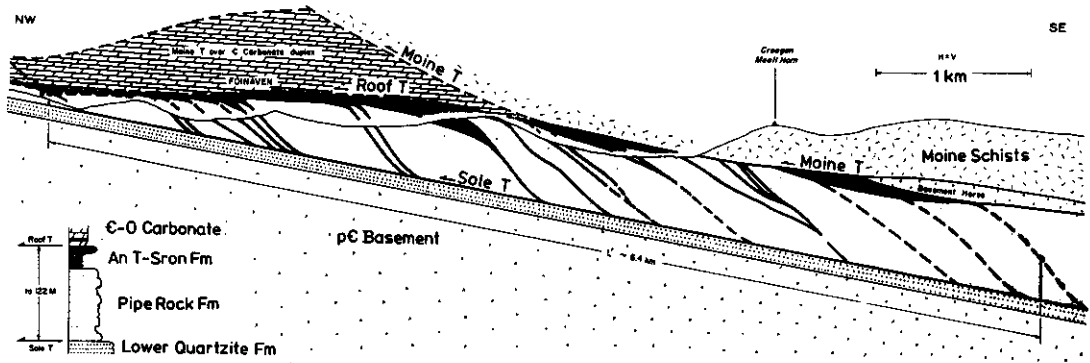
Balanced cross-section とは

Balanced cross-section (バランス断面図) (Dahlstrom, 1969) という断面図の作成法は、断面図の中に描かれている地層が、褶曲や断層などの変形を元に戻した時に、変形前の地層が積み重なったテンプレート (template) に過不足なく復元できるように作るものである。断層の形態や変位、褶曲の巻き方などには多くの幾何学的制約が存在するため、断面図を作成する時に元のテンプレートに復元可能かどうかを常に念頭に置いておく必要がある。地表調査で得られた地層や断層の走向・傾斜から、丹念に地下やすでに侵食されてしまった空中の部分の断面を合理的な断層の動きで復元可能なように描いていくわけである。balanced という言葉は作成された断面図と変形前の地層のテンプレートが、釣り合っているという意味から使われている。BCS 作成にあたっての基本的な仮定は、(1) 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、の 3 点であるが、これにはずれる場合でもそれぞれの影響を見積って作成される。

BCS 作成法に関しては、Woodward et al. (1985) や Woodward et al. (1989) に詳しく説明されているし、1985 年以降に出版された一般的な構造地質学の教科書でも取り上げられ、特に Marshak & Mitra (1987) では 30 ページにわたって詳しく説明されている。BCS の概要に関しては村田 (1988) が簡単に紹介しており、また、研究

*東京大学理学部地質学教室

Geological Institute, University of Tokyo



第1図 Moine thrust zone のFoinaven duplex. Elliott & Johnson(1980)のBoyer & Elliott(1982)による修正図。一部簡略化。

史とその重要性に関しては中村(1988)によくまとめられているので参照されたい。

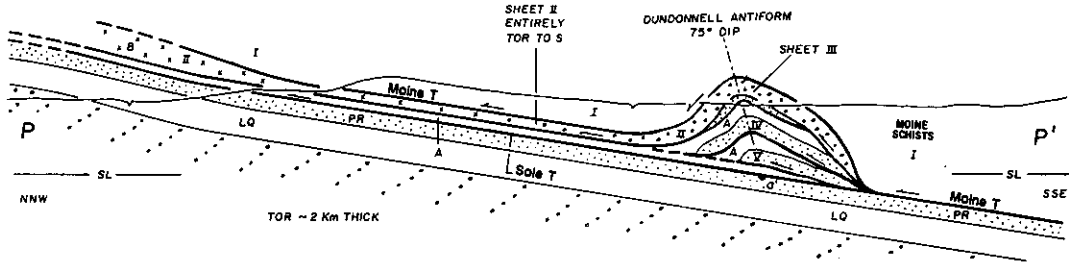
衝上断層の階段状形態とduplex

衝上断層は一般に地層に平行なflatの部分と、地層を斜めに切り上がるrampの部分とが連なって階段状の形態をとり、結果的に、より上位の地層を切っていくことが知られている。ひと続きのflat(低位) - ramp - flat(高位)に沿って上盤の地層が衝上すると、断層の形態に制約されて上盤に2向斜・2背斜が形成される(村田, 1988, 第1図)。BCS作成時には、このような断層の屈曲に伴う褶曲(fault-bend fold)から、地下に衝上断層のrampの存在が推定される場合が多い。

上記のflat-ramp-flatに沿って上盤が衝上した後、低位のflatが前方に延び、新たなrampを下盤に形成して上位のflatに合流すると、下盤の一部がはぎとられて上盤の一部として衝上する。これを次々に繰り返して古い衝上断層の下盤側に新しい衝上断層がつくられていくと、最終的に2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duplex(デュプレックス)と呼ばれる構造で、上側の衝上断層はroof thrust, 下側のものがfloor thrust, 中にはさみこまれたブロックが

horseである(Boyer & Elliott, 1982)(村田, 1988, 第2図参照)(第1図)。ちなみにduplex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(horseにあたる)が二重に重なっているものである。duplexの認定にはroof thrustの存在が最も重要となる。また、duplexは新しい衝上断層が衝上方向つまり下盤側にできていくpiggy-backスタイルの衝上順序で形成される。

duplexはhorseの長さそれぞれの衝上断層の変位量の関係で、horseの重なり方が異なるため3種に分けられる。horseの長さに対して変位量の小さいものは、horseが後方に傾斜するhinterland-dipping duplexである。horseの長さと同じ位置で次々に積み重なるため、antiformal stackを形成する。horseの長さよりも変位量が大きいと、foreland-dipping duplexを作る(Boyer & Elliott, 1982; Mitra & Boyer, 1986)(村田, 1988, 第3図)。特にantiformal stackではroof thrustとその上盤の地層は大きく背斜状に褶曲し、前縁のroof thrustは前方に回転する。そのため、現在はroof thrustが伸張断層のように傾斜方向に下降して変位する見かけを呈する(第2図)。duplexはfloor thrustよりも下側には影響を及ぼさない。そのため、水平に近い衝上断層あるいはデ



第2図 Moine thrust zoneのDundonnell antiformal stack. Elliott & Johnson (1980)による。I~Vの順にthrust sheetが形成された。一部加筆。

コルマ帯の上に背斜状の高まりが見られる時、同層準の地層が厚い集積体を作る機構として注目されている。

Moine thrust zone

Moine thrust zone (MTZ)はNNE性のトレンドでWNW方向に向かう衝上断層帯で、いくつかの大規模な衝上断層とそれに伴う多くの小規模な衝上断層群からなり、覆瓦状構造(imbricate structure)を作っている。有名なMoine thrustは最も上位つまり東側に位置し、先カンブリア時代の砂岩を源岩とするMoine schistを衝上させている(Peach et al., 1907)。衝上断層に沿って見られるマイロナイトは地下深所で形成され、それに引き続く衝上運動により現在地表にもたらされたものであり、マイロナイトが地下浅所での脆性な衝上断層の上ののっている。

MTZの前縁地は、先カンブリア時代のLewisian gneissとそれを不整合に覆うTorridonian sandstone,そして両者を不整合に覆うカンブリアーオールドビス系のコーツァイト・石灰岩からなり(Peach et al., 1907; Swett, 1969), MTZにはこれらの岩石がまきこまれている。

MTZのduplex

Elliott & Johnson (1980)はMTZの最も下位の

Sole thrustが一定の傾斜で東側へ延びていると考え、BCSの作成を試みた。彼らはBCSの作成を通して、MTZで古くから明らかにされていた覆瓦状構造を、大規模な衝上断層であるMoine thrust, Ben More thrust, Glencoul thrustをroof thrustとしその下盤に形成されたduplexと認定した。Foinaven duplexはそのひとつで、Moine thrustの一部をroof thrustとし、floor thrustはSole thrustである(第1図)。duplexの認定とその空間的広がりをはっきりさせるためには、BCSを作成し変形前の状態に復元可能なことを確かめる必要がある。彼らの断面図にはduplexが多く描かれており、その認定に多くの努力がふりむけられている。

BCS作成にあたり、これまでの膨大な地表データの蓄積が生かされていることはいうまでもない。また、露頭スケールの地質構造の観察は、BCSの考えをもって行われないと、重要な構造を見落とすことになる。MTZでは、そこにまきこまれているカンブリアーオールドビス系が、本来、大陸棚にフラットにたまった堆積物で、層序がよく分かっており、側方変化も小さいことが有利に働いた。

Elliott & Johnson (1980)はduplexは常に大規模な衝上断層の下盤側に形成されたと考えた。これはduplexを作る衝上断層群ではroof thrustの変位量が最も大きいことを意味するが、他の衝上

断層帯のduplexは必ずしもそうっていない。

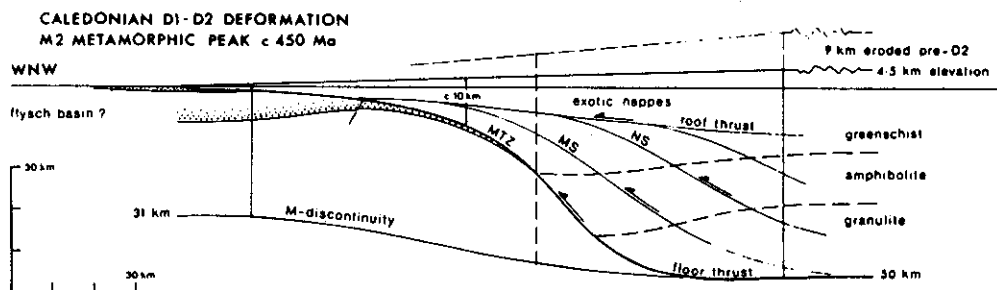
その後の研究によるとMTZではElliott & Johnson (1980)が考えたほど完全な形をしたduplexは少なく、むしろ、duplexを作る衝上断層の一部がroof thrustを突き破ってしまうbreached-roof duplexが一般的であるとされている (Butler & Coward, 1984; Butler, 1987)。また、一度形成されたduplexが後で後背地側からやってきた衝上断層によって切断されているものが多くみられ (McClay & Coward, 1981), Assynt南部のMoine thrustの下盤の覆瓦状構造はそのようなものと考えられている (Butler, 1987)。また、露頭スケールの小規模なduplexも観察される (Butler, 1987)。

衝上断層の形成順序

MTZの衝上断層の形成順序 (thrust sequence) については、Peach et al. (1907)以来、前縁地から後背地へというoverstepの考えが支配的であった。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。これに対してElliott & Johnson (1980)は現在見られる衝上断層同士の幾何学的配置だけからは、上から覆いかぶさっている方が必ずしも、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。

Moine thrustが、下にはりついたduplexによって褶曲し、背斜状の高まりを形成すると、roof thrustの上のナップにも高まりを形成する。Assynt地域でMTZが地表に幅広く分布するのは、このようなduplexが量的に多いためMoine thrustが半ドーム状に褶曲しているためである (Elliott & Johnson, 1980)。この事実は衝上順序がpiggy-backであることを示している。Ben More thrustやGlencoul thrustも同様に下盤側にはりついたduplexによって褶曲している。また、褶曲したMoine thrustが平面的なSole thrustの上位に位置することからも大規模な衝上断層もpiggy-backで形成したとみなされた。Dundonnell antiformal stackの存在が、piggy-backの衝上順序の認定により証拠となった (第2図)。なお、Assyntのduplexによる高まりの後背地側にはduplexの総量に見合う構造の落込みがMoine schist中に見出されている (Butler & Coward, 1984)。

一方、すでに述べたbreached-roof duplexの存在や、すでに形成されていたduplexが後の衝上断層で切断されている事実は、thrust sequenceが単にpiggy-backスタイルだけでなく、overstepスタイルによるものが多く含まれることを示す (Butler & Coward, 1984)。これは、前縁地側へ次々と形成されていく一般的なin-sequence thrust以外に、衝上方向は同じであるが順番からはずれるout-of-sequence thrustの存在を意味す



第3図 NW Highlands crustal duplex. Soper & Barber (1982)による。この後さらにMoine thrust zone (MTZ)が活動し、roofナップが侵食されつくした。MS: Meadie slide, NS: Naver slide。一部加筆。

る。また、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、実際はかなり複雑な幾何学を持っている (Butler, 1987; Coward, 1988)。これらは当然BCS作成に反映されなければならない。また、衝上断層のトレンドと斜交するbuckle-foldが存在し、これは衝上断層のトレンド方向の変位量の変化によるとされている (Coward, 1988)。さらに、MTZには、衝上と同じ方向に明らかに衝上断層を切る伸張断層があり、隆起後の重力滑動によるものとされ (McClay & Coward, 1981; Coward, 1985)、これらが衝上断層帯の幾何学を一層複雑なものにしている。

Crustal duplex

Soper & Barber (1982)はカレドニア造山帯で、MTZが地下深くでrampを形成し、モホ面にまで達してこれに漸近して合流すると考えた。つまり、モホ面を衝上断層のflatと考えたわけである。また、Moine schist中のMeadie slide, Naver slideなども漸近してこれに合流していると考えた。なお、slideというのは、スコットランド高地の変成帯中に特有の断層用語で、本来低角で後で褶曲してしまっている延性な衝上断層（あるいは伸張断層）のことである。彼らはこれらの衝上断層が地殻全体としてひとつのduplexをつくっていると考え、crustal duplexを提唱した (NW Highlands crustal duplex) (第3図)。crustal duplexのfloor thrustはMoine thrustおよびその先のモホ面そのものであり、roof thrustとその上盤のナップは現在削剥されてしまっていて地表では見られない。crustal duplexにもBCSの考えが生かされており、造山帯の地殻の厚化を説明するためには、地殻全体を巻き込むスケールのduplexが不可欠としている。

BCSの作成を延性変形の領域である地殻下部にまで延長することは、BCS作成の本来の仮定を大きくはずれるわけであるが、全体としてのマスマランスを考えた時、BCSを適用していくことは可能であろう。同様の造山帯の地殻深部までの衝上断層群の幾何学を考えたものとしては、Butler (1983, 1986)やCoward & Butler

(1985)などによるアルプス、ヒマラヤの深部構造の例があり、これにはBCSの考え方が用いられている。

MTZの短縮量

BCSを作成することにより、復元された地層のテンプレートが得られる。現在地表に見られるduplexのほとんどは、roof thrustは侵食されており、厳密にduplexの大きさを知ることはできない。しかしながら、duplexの最小の大きさを得られるので、それを復元したテンプレートの最小の長さを知ることができる。BCSの作成により、衝上断層帯の短縮量の最小値を出せるわけである (Hossack, 1979)。なお、一度形成されたduplexが切断されたものを、完全なduplexと間違えて認定すると、短縮量の最小値を過小に見積ってしまうので注意が必要である。

Coward et al. (1983)およびButler & Coward (1984)のカンプリア系のコーツァイトを用いての見積りによると、MTZの短縮量の最小値は54 kmとされている。彼らはcrustal duplexの考えに対して、MTZのrampの位置はSoper & Barber (1982)が考えたよりもはるかに造山帯の内側であったとしている。BCS作成によってより厳密に求められた短縮量の最小値は、このように地殻深部の構造を考える時に、重要な役割を果たすことになる。

おわりに

BCS作成がMTZのduplexの認定、thrust sequence、短縮量の最小値の見積りなどに多くの貢献をしてきた。地質構造を正しく把握するためには、正確な断面図が必要であり、変形前の状態に復元可能なBCSは可能性のある断面図として最も効果的な議論が可能となる。そのためには、層序がしっかり明らかになっている必要があるが、これは必ずしも厚さも層相変化もない地層でないとできないというのではない。また、BCS作成の概念は、露頭観察や地殻スケールの深部構造を正しく理解するためにきわめて重要である。

文献

- Boyer, S.E. & Elliott, D., 1982: Thrust systems. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, v. 66, 1196-1230.
- Butler, R.W.H., 1983: Balanced cross-sections and their implications for the deep structure of the NW Alps. *J. Struct. Geol.*, v. 5, 125-138.
- , 1986: Thrust tectonics, deep structure and crustal subduction in the Alps and Himalayas. *J. Geol. Soc. Lond.*, v. 143, 857-873.
- , 1987: Thrust sequences. *J. Geol. Soc. Lond.*, v. 144, 619-634.
- & Coward, M.P., 1984: Geological constraints, structural evolution, and deep geology of the Northwest Scottish Caledonide. *Tectonics*, v. 3, 347-365.
- Coward, M.P., 1985: The thrust structures of southern Assynt, Moine thrust zone. *Geol. Mag.*, v. 122, 595-607.
- , 1988: The Moine thrust and the Scottish Caledonides. In "Geometries and mechanisms of thrusting, with special refernce to the Appalachians (eds. G. Mitra & S. Wojtal)". *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, no. 222, 1-16.
- & Butler, R.W.H., 1985: Thrust tectonics and the deep structure of the Pakistan Himalayas. *Geology*, v. 13, 417-420.
- , Knipe, R.J. & Butler, R.W.H., 1983: Discussion on a model for the deep structure of the Moine thrust zone. *J. Geol. Soc. Lond.*, v. 140, 519.
- Dahlstrom, C.D.A., 1969: Balanced cross-sections. *Canad. J. Earth Sci.*, v. 6, 743-757.
- Elliott, D. & Johnson, M.R.W., 1980: Structural evolution in the northern part of the Moine thrust belt of NW Scotland. *Trans. R. Soc. Edin. (Earth Sci.)*, v. 71, 69-96.
- Hossack, J.R., 1979: The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction: a review. *J. Geol. Soc. Lond.*, v. 136, 705-711.
- Marshak & Mitra, G., 1988: Basic methods of structural geology. 446p. Prentice Hall.
- McClay, K.R. & Coward, M.P., 1981: The Moine thrust zone: an overview. In "Thrust and Nappe Tectonics (eds. K.R. McClay & N.J. Price)". *Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.*, no. 9, 241-260.
- Mitra, G. & Boyer, S.E., 1986: Energy balance and deformation mechanisms of duplexes. *J. Struct. Geol.*, v. 8, 291-304.
- 村田明広, 1988: Balanced Cross SectionとDuplex, *地学雑*, v. 97, 504-512.
- 中村光一, 1989: Balanced cross-section法とGGT. *月刊海洋*, v. 21, 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.*
- Soper, N.J. & Barber, A.J., 1982: A model for the deep structure of the Moine thrust zone. *J. Geol. Soc. Lond.*, v. 139, 127-138.
- Swett, K., 1969: Interpretation of depositional and diagenetic history of Cambro-Ordovician succession of N.W. Scotland. In "North-Atlantic Geology and Continental Drift (ed. M. Kay)". *Mem. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, v. 12, 630-646.
- Woodward, N.B., Boyer, S.E. & Suppe, J., 1985: An outline of balanced cross-sections. *Univ. of Tennessee, Dept. of Geol. Sci. Studies in Geology*, 2nd edn. 170p.
- , ----- & -----, 1989: Balanced geological cross-sections. *IGC Short Course*, v. 6, 144p. *Amer. Geoph. Union.*

(受理：1990年3月23日)