論 説

単純剪断変形が存在する時の断層 折れ曲がり褶曲構造に対する幾何学的検討

玉川 哲也*・松岡 俊文**・田村 八洲夫*

Geometrical Shape of Fault - bend Folding with Simple Shear Deformation in the Thrust Sheet

Tetsuya TAMAGAWA *, Toshifumi MATSUOKA **, Yasuo TAMURA *

Abstract : Fault related folding structures have been investigated by many authors for geological studies of overthrust areas. Three basic models such as fault - bend folding, fault - propagation folding, and detachment folding were developed with distinct geological scenarios for fold thrust interactions. Each model has distinct geometrical relationship between fault and fold shapes.

In this paper we derive the geometrical shape of fault - bend folding with a simple shear deformation in a hanging wall. We show that the fault - bend folding can exist when a cutoff angle of the ramp fault is greater than 30 with a simple shear in a hanging wall. Also, we show the schematic diagram to easily evaluate the simple shear deformation in the thrust sheet from the geometrical shape of a fault - bend folding that is obtained by the reflection seismic method.

Key Words : Fault - Bend Fold, Simple Shear, Thrust Tectonics, Cutoff Angle

1. はじめに

断層が介在する場合の褶曲構造については, Suppe (1983), Suppe and Medweff (1990), Poblet and McClay (1996)など多くの研究者によって, その幾何学的及び運動学的な考察が与えられてきた。これらの研究の中で, 一番最初に Suppe (1983)によって体系づけられた, 断層折れ曲がり褶曲 (fault - bend fold) に対する考察の手法は, それに引き続く多くの研究の一つの手本となった。

Suppe (1983)のアプローチは, バランス断面図 (Balanced Cross Section) と呼ばれる作図法 (Dahlstrom, 1969, 村田, 1988) と対をなす考えであった。このアプローチは, 褶曲構造の形成過程において, 対象としている地層の変形に関して幾何学的な制約を設けることにより, それに従う褶曲モデルの提唱であった。これら提唱されたモデルは, 幾つかの批判的な見解は有るものの (Ramsay, 1992), 衝上断層系の解析においては, 広く受け入れられている (McClay, 1992)。国内においても実際にこの様な褶曲モデルを用いた解析が試みられ, 地下構造の

解釈作業に利用されている (小椋他, 1994)。

本論文で考察するのは, 褶曲の形成過程で地層内に単純剪断変形が生じた場合である。Suppe (1983)は, 断層折れ曲がり褶曲の形成過程において, 衝上断層の上盤内部に単純剪断が生じた場合をすでに考察している。その後 Mitra (1992)もこの問題について議論を行っている。しかしながら, 彼らの議論は充分ではなく, 単純剪断が存在する場合の, 一般的な幾何学的な形状を示すに至らなかった。我々はこの問題に対して, Suppe (1983)が行った議論を再検討し, 一般的な場合の褶曲構造の形態を導いたので, それについて報告する。

2. 断層折れ曲がり褶曲

断層が介在する褶曲構造は, 現在では第1図に示すように, 大きく以下の3つのタイプに分類されている。

(1)断層折れ曲がり褶曲 (fault - bend fold) (Suppe, 1983)

褶曲構造の発達前にランプ状の断層が存在し, この面に沿って断層の上盤の地層が滑った場合

1996年11月6日受付 1998年2月19日受理

* 石油資源開発(株)物理探鉱部 140-0002 東京都品川区東品川2-2-20 Japan Petroleum Exploration Co. Ltd, 2-2-20, Higashi Shinagawa, Shinagawa - Ku, Tokyo 104-0002, Japan, E-mail: tama@japex.co.jp

** 京都大学大学院工学研究科資源工学専攻 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町 Kyoto University, Faculty of Engineering, Department of Earth Resources Engineering, Yoshida Honcho, Sakyou - ku, Kyoto, 606-8501, Japan, E-mail: matsuoka@tansai.kumst.kyoto-u.ac.jp

(2)断層伝播褶曲(fault-propagation fold)(Suppe and Medweff, 1990)

褶曲構造の発達に伴って、断層自身がランプ状に成長していく場合

(3)デタッチメント褶曲(detachment fold)(Poblet and McClay, 1996)

褶曲構造の発達前に、層理面に平行な断層面だけが存在していた場合

我々がここで考察するのは断層折れ曲がり褶曲の場合である。第2図に断層折れ曲がり褶曲の運動学的形成過程を示す。横方向の圧縮によって、上盤の地層がランプ状の断層に沿って乗り上げて、左方へ移動していく。本来地層はこの様な直線的な変形を受けるとは考えづらいが、褶曲構造に対する幾何学的な考察を行うために、単純化して考えることとする。ランプの存在によって断層の上盤が受ける変形の範囲は、褶曲軸面(axial surface)であるB'点からA'点までである。

Suppe(1983)はこの様な褶曲構造の形成過程に関して、以下の様な仮定を設ける事によってその幾何学的な形態を考察した。

(1)褶曲形成の時の変形は、考えている平面内での歪とする。

(2)ここで生じている褶曲は平行褶曲とする。

(3)変形による面積(体積)変化は無いとする。

これらはバランス断面図を作成する際の仮定と基本的に同等である。村田(1988)は、断層が介在している褶曲構造の実例を示しながら、これらの仮定について地質学的な観点から詳細に議論している。この様な仮定の下での作図法がバランス断面図と呼ばれる理由は、作図された地質構造が、変形前と衝上断層を伴う褶曲構造を形成した後で、面積がバランスしているという事実に基づいている。

Suppe(1983)は、褶曲構造を特徴づける幾つかの角度の関係を導くために、第3図の様な場合を考えた。断層の上盤は横方向の圧縮によって、断層の上に押し上げられると考える。その際、断層の上に飛び出した部分は、断層面との間に隙間を作ることなく、下方に折り曲げられるとする。するとこの変形が、上の3つの条件を満足する場合には、褶曲の形態を一意に決めることが出来る。具体的には褶曲軸面と両翼のなす角度が決定される。これがSuppe(1983)によって初めて示された、褶曲構造の幾何学的な考察の基本アイディアであった。

この褶曲構造は、形態を表す4つの角度によって特徴づけられる(第4図参照)。このうち2つは断層の形状に関する角度であり、残り2つは褶曲の形状を表す角度である。具体的には、断層のランプ部分と層理面がなす角を、カットオフ角 θ と呼ぶ。次に断層がランプ部分からフラット部分に至る時の断層の傾きの変化角を ϕ とする。通常この様な断層は第2図に示したようなフラットーランプーフラット形態で階段状をなし、フラットの部分はインコンピテントな層(砂岩頁岩互層内の頁岩)内に生じ、層理

a: 断層折れ曲がり褶曲

b: 断層伝播褶曲

c: デタッチメント褶曲

第1図 断層が介在する褶曲構造。

第2図 断層折れ曲がり褶曲の運動学的形成過程。

面と平行する場合が多い。この場合は角度 θ と ϕ は一致する。しかしながら、断層の形成前に褶曲変形などが生じている場合には、両者の角度は一般には一致しない(垣見・加藤, 1994)。褶曲構造を表す2つの角度とは、断層の上盤の地層が断層面となす角 β と褶曲軸面と片翼のなす角 γ

である。(第4図参照)。

面積不変の仮定は, Suppe(1983)の最初の考察では, 具体的には次の2つの幾何学的な条件に書き換えられた。即ち, 変形の前後で,

(1)地層(単層)の長さは変化しない

(2)地層の層厚は変化しない

という条件である。この2つの条件が満足されている限り, 地層の面積(体積)は変形によって変化しない事は自明である。

まず単層の長さが変化しない条件を考える。これは第5図においてbcの長さと, bdの長さが一致している条件である。次に層厚が変化しないという条件を考える。キンク法(Kink method)を用いて作図する際, 常に褶曲軸面によって両翼の交角を常に2等分することによって, 層厚を一定に保つことが出来た(Tearpock and Bischke, 1991)。同様にここでは点bにおいて, 褶曲軸面と各片翼の交角は等しい(図5参照)。すると第5図において, この2等分という条件とbc = bdの条件より, 折れ曲がった三角形abdと, もとの三角形abcの面積は等しくなる事が言える(付録A参照)。

これらの事を数学的に見ると, 褶曲構造を規定している4つの角度(θ , ϕ , β , γ)に対して, 2つの条件式が存在していることを表している。そのため断層の形状に関する2つの角度が与えられると(カットオフ角度 θ と断層の傾きの变化角 ϕ), 褶曲の形状を表す2つの角度は, 一意に決定できることが示唆される。そこでこれらの関係式を具体的に導く。

まず単層の長さに対する条件式

$$bc = bd$$

より次の関係式が導ける(付録A参照)。

$$\tan \phi = \frac{-\sin(\gamma - \theta)[\sin(2\gamma - \theta) - \sin \theta]}{\cos(\gamma - \theta)[\sin(2\gamma - \theta) - \sin \theta] - \sin \gamma} \quad (1)$$

さらに $\theta = \phi$ の場合, すなわち断層の形状が, 上側と下側で平行となる単純なステップ上の断層の場合には, (1)式は以下の様により簡単な式となる。

$$\tan \theta = \tan \phi = \frac{\sin 2\gamma}{2\cos^2 \gamma + 1} \quad (2)$$

次に層厚一定の条件は, 角度に関する次の関係式を与える。

$$\beta = \theta - \phi + (180^\circ - 2\gamma) \quad (3)$$

(1)式において θ と ϕ を与え, γ について解く。 γ がわかれば(3)式によって, β を求める事が出来る。この結果はSuppe(1983)によって第6図の様に示された。

第6図において右半分は θ が負の値に対応している。こ

第3図 断層の上に押し上げられた地層の先端は, 断層面との間に隙間を作ることなく断層面上に折り曲げられたと, 仮想的に考える。

第4図 褶曲構造の角度の関係。 θ と ϕ は断層面の形態を決め, γ と β は褶曲構造の形態を決める。

第5図 地層の面積が保存される条件は, bcとbdの長さが一致することと, 常に褶曲軸面によって両翼の交角が2等分されることである。

第6図 断層の角度 θ と ϕ と、断層折れ曲がり褶曲構造の角度 γ と β との関係のグラフ。Suppe(1983)より転載。

これは断層折れ曲がり褶曲においては、ランプ以先のフラット部の方がランプ部より高角な場合であり、通常は考えづらい。次に第6図において「 ϕ ＝一定」のラインを見てみる。すると与えられた θ 、 ϕ に関して解が2つ存在している事がわかる（ ϕ ＝一定の曲線と θ ＝一定の直線は、 β 、 γ が異なる2つの点で交わる）。これは具体的には第7図で示す様な、2つの異なった褶曲形態が存在することを表している。通常断層折れ曲がり褶曲の場合には、第1モードの場合が多く見られるが、断層伝播褶曲を考察する際には、第2モードが重要な役割を果たす（Suppe and Medweff, 1990）。

さらに第6図は、勝手に θ と ϕ を与えても、断層折れ曲がり褶曲は形成されない場合がある事を示している。即ち「 ϕ ＝一定」のラインは θ の全ての領域にわたって存在していない。いま $\theta = \phi$ の場合を考えると、許される断層の最大の傾斜角 θ は30度までという事がわかる。すなわち、断層の傾斜角が30度以上の場合、上で述べた条件（単層の長さおよび層厚が不変）を満足するような断層折れ曲がり褶曲は、形成出来ないことがわかる。一般的に断層折れ曲がり褶曲を形成する衝上断層系において断層の角度は小さいと言われている。しかしながら国内などの非常に複雑な構造運動を示す地域においては、断層の角度が30度以上の場合も考えられる。さらに Boyer and Elliott (1982)によれば、45度程度の角度を持つ衝上断層系の存在も指摘されている。これは、ここで述べた単純な断層折れ曲がり褶曲のモデルを適用するには、Suppe(1983)が

第7図 断層折れ曲がり褶曲の第1モードと第2モード。

導いた結論だけでは不十分であり、断層の角度が30度を越える場合には、デュプレックスのような場合を考えるか、あるいはSuppe (1983)の理論を拡張する必要があることを示唆している。後述するように、実は断層の上盤内

に単純剪断の存在を許すならば、ランプの角度が30度を越えた場合でも単純な断層折れ曲がり褶曲が存在できることがわかる。

3. 断層の上盤内に単純剪断が存在する場合

以下においては断層の上盤内に単純せん断が存在する場合の褶曲構造について考察するが、その準備として、Suppe(1983)が導出した関係式を変形しておく。そのために、ここでは、今後の議論の見通しを容易にすると同時に、式の形を見やすくするため、新しく図4で示される新しい角度、 $\phi (= \theta - \psi)$ を導入する。この角度は、ランプを挟んだ両フラット部の断層面の交角である。

この新しく定義した ϕ を用いて(1)式を書き直すと、以下の式を得る事が出来る。

$$\tan \phi = \frac{\sin \gamma (2 + \cos 2\gamma) \sin \theta - \sin \gamma \sin 2\gamma \cos \theta}{\cos \gamma (1 + \cos 2\gamma) \sin \theta - \sin \gamma \cos 2\gamma \cos \theta} \quad (4)$$

また(3)式は

$$\beta = \phi + (180^\circ - 2\gamma) \quad (5)$$

と書くことが出来る。

さらに $\theta = \phi$ の時、直ちに $\phi = 0$ の場合（ランプを挟む両フラット部は平行な断層の時）には、(4)式より直ちに(2)式を得ることが出来る。

さらに(4)式の関係式を、Suppe(1983)が最初に描いた図6と同様に、 γ と θ に対して ϕ をパラメータとして、角 ϕ が一定となる曲線群を図8に描く。今議論を簡単にするため、 θ は正の場合だけを示した。

この図8はSuppe(1983)が導いた図6と本質的に同じ情報を含んでいる。まず与えられた θ に対して、 ϕ を決めると、 γ について解は2つ存在していることが分かる。これらは前の場合と同様に、第1、第2モードに対応している。そしてこの2つの解は、 θ がある値の時に同一の値となり、それよりも大きな θ の値では、解は存在しないことが分かる。例えば $\phi = 0$ の時には、 θ が30度以上では解は存在しない事が容易に分かる。さらに図8を用いると、 θ と ϕ の関係において、バランスした褶曲構造の形成可能な範囲が、図6よりも簡単に認識できる。

ここまでの議論は第2図に示すように、断層面を滑った上盤の右端はすべり面に垂直と考えてきた。即ち断層の上盤は、ランプにかかる以前は地層全体が平行に滑ったと考え、内部では剪断は生じていない。しかしながら、第9図に示すように実際の褶曲構造では、上盤が滑った事により地層内に単純剪断が形成されていると考えられる(Elliott, 1976)。断層折れ曲がり褶曲の様に前方に有る障害を、ランプに沿ってスラストアップしながら形成される褶曲は、地層を構成している単層単位で見れば、各単層間でスリップ量が異なっていると考えられる。これを地層全体で見ると、内部に単純剪断の存在が示唆される。無論 Elliott

第8図 断層の角度 ψ と ϕ と、断層折れ曲がり褶曲構造の角度 γ と β との関係のグラフ。

Originally rectangular grid stamped onto a stack of paper and cut by a thrust fault. Trailing edge moves forward 7 units along thrust and necessarily assumes a concave shape. Leading edge along thrust moves forward 11 units. Note the widespread distribution of simple shear strain as a result of movement over this footwall step. (Drawn from photograph.)

第9図 上盤内に剪断変形が生じている場合。Elliott(1976)より転載。

(1976)が示すように実際の褶曲構造においては、断層面に近いほど歪み量は大きくなると考えられる。つまりここで考察を加える単純剪断の様な場合は、マクロに見るならば許容されるかもしれないが、ミクロな考察においては、単純化されすぎている事を断っておく。

単純剪断が存在する場合の断層折れ曲がり褶曲の褶曲形態に関しては、その重要性からSuppe(1983)においても考察され、(1)式と同様な幾何学的な関係式が導かれた。しかしながら、このSuppe(1983)の論文の(31)式は正しくなく、Suppe and Medweff (1990)において修正されたが、この修正された式も正しくない。その後、この問題に関してはMitra(1992)が $\theta = \phi$ という簡単なケースに関してのみ考察した(付録B)。そのため我々はここで、Suppe and Medweff (1990)が出来なかった単純剪断が上盤内に存在する場合の一般的な褶曲構造の関係式、即ち(1)式に対応する一般式の導出を行うと同時に、その挙動について検討を加える事とする。

具体的にここで考察する場合の単純剪断を第10図に示す。剪断を表すパラメータとして、剪断歪量 α とする。すると単位層厚の地層においては、この剪断変形によって地層の上面は、下面に比べて $\tan \alpha$ だけさらに左の方向にスリップしたと考えられる。その為に第5図に示した三角形は第10図のようになる。つまり、単純剪断によって見かけ上、地層上面の単層の長さは次の様に変化したと考えられる。

第10図 単純剪断の存在により地層が見掛上長くなったと考える。

$$\cot \theta' = \tan \alpha + \cot \theta \quad (6)$$

さらに剪断が存在しない時と、剪断が存在する時の角度の差は、 θ と ϕ で同じである。

$$\theta - \theta' = \phi - \phi' \quad (7)$$

これを変形すると、次式を得る。

$$\phi = \theta - \phi = \theta' - \phi' = \phi' \quad (8)$$

(8)式より分かることは、先ほど我々が導入した角度 ϕ は、単純剪断の存在に対して不変量となっている。このため、(4)式の関係は θ が θ' となり、 γ が γ' となっても成立する。即ち単純剪断が存在する場合の一般的な関係式は次式で与えられる。

$$\tan \phi' = \tan \phi = \frac{\sin \gamma' (2 + \cos 2\gamma') \sin \theta' - \sin \gamma \sin 2\gamma' \cos \theta'}{\cos \gamma' (1 + \cos 2\gamma') \sin \theta' - \sin \gamma \cos 2\gamma' \cos \theta'} \quad (9)$$

ここで(6)式の関係を用い、断層のカットオフ角 θ で書き直すと次式を得る。

$$\tan \phi = \frac{\sin \gamma' (2 + \cos 2\gamma') - \sin \gamma' \sin 2\gamma' (\tan \alpha + \cot \theta)}{\cos \gamma' (1 + \cos 2\gamma') - \sin \gamma' \cos 2\gamma' (\tan \alpha + \cot \theta)} \quad (10)$$

この式が、単純剪断 α が存在する場合の褶曲軸面の角 γ' を、断層の形状に関する角 θ と ϕ で表す最も一般的な方程式である。また上盤が断層面となす角 β' と褶曲軸面の角 γ' との間には、(3)式とまったく同様な次式が成立している。

$$\beta' = \phi + (180^\circ - 2\gamma') \quad (11)$$

またここで導出した式において、さらに $\phi = 0$ の条件を課すと、次式を得る。

$$\begin{aligned} \cot \theta &= 2 \operatorname{cosec} 2\gamma' + \cot 2\gamma' - \tan \alpha \\ &= 2 \operatorname{cosec} \beta - \cot \beta - \tan \alpha \\ \therefore \sin \gamma' (2 + \cos 2\gamma') &= \sin \gamma' \sin 2\gamma' (\tan \alpha + \cot \theta) \end{aligned} \quad (12)$$

これは単純剪断が存在する場合に Mitra (1992)によって導出された式と一致する。つまり Mitra(1992)の結論は、我々の一般式(10)式の特例である。

具体的に断層の形状と剪断量が与えられたときには、(10)式を解いて褶曲軸面の角 γ' を求めれば、褶曲の形がわかる。そこで(10)式をさらに変形すると、最終的に $\cot \gamma'$ に関する次の3次の方程式が得られる。

$$A \cot^3 \gamma' + B \cot^2 \gamma' + C \cot \gamma' + D = 0 \quad (13)$$

$$A = 2 \sin \theta \tan \phi$$

$$B = -3 \sin \theta - (\cos \theta + \sin \theta \tan \alpha) \tan \phi$$

$$C = 2 \cos \theta + 2 \sin \theta \tan \alpha$$

$$D = -\sin \theta + (\cos \theta + \sin \theta \tan \alpha) \tan \phi$$

これを γ' に関して解くことによって、与えられた断層の形態に対して、単純剪断が存在する場合の褶曲の形状を決めることが出来る。

4. 図式解法

前章で述べた(10)式あるいは(13)式を用いて断層面の形状(ϕ , θ)と単純剪断量(α)から褶曲構造の形態(γ')を求めるという操作は、作図によっても簡単に求めることが

第11図 断層の角度 ϕ と θ および単純剪断量 α 、断層折れ曲がり褶曲構造の角度 γ と β との関係のグラフ。

可能である。必要な図面は(9)式の関係 ($\phi' = \phi$, θ' , γ' の関係式)と(6)式の関係 (θ , θ' , α の関係式)のそれぞれをグラフにした図である。ところで、(9)式の各パラメーターの関係図は、 ϕ が単純剪断量に対して不変量となるため、単純剪断量に関係なく図8と同一であることがわかり、図8の横軸・縦軸の単位を θ から θ' に、 γ から γ' に変更した図であることがわかる。

これを図11の上図に示す。また、(6)式の関係は図11の下図に示す。

具体的には図11の下図から θ と α を用いて θ' を求め、さらに図11の上図から $\phi' = \phi$ と θ' を用いて γ' を求めればよい。例えば、 $\theta = 35.0$ 度、 $\phi = 0.0$ 度の断層面による断層折れ曲がり褶曲の形成を想定する。この時、単純剪断量 α がないと褶曲構造は形成されないが、仮に単純剪断量を $\alpha = 30.0$ 度とすると、図11の下図から $\theta' = 26.5$ 度となり、よって図11の上図から第1モードの褶曲構造は、 $\gamma'_1 = 71.7$ 度、 $\beta'_1 = 36.6$ 度であり、第2モードの褶曲構造は、 $\gamma'_2 = 44.8$ 度、 $\beta'_2 = 90.4$ 度であることがわかる。

逆に断層面の形状(ϕ , θ)および褶曲構造の形態(γ)から単純剪断量(α)を求めることも可能である。図11の上図から ϕ と γ' を用いて θ' を求め、次に図11の下図から θ' と θ を用いて単純剪断量(α)を推定すればよい。

このように上盤全体に単純剪断及んだ場合の褶曲構造の形態の推定や、逆に褶曲構造の形態から単純剪断量の推定が作図によって簡単にできるのは、単純剪断に対して不変量パラメーター ϕ を導入したことによる。Suppe(1983)が導入したパラメーター ϕ で考えた場合、単純剪断量に応じて ϕ が変化することになる。つまり、各単純剪断量に対して図6が変化することになり、図式解法は困難になる。

5. おわりに

本論文では、単純剪断が有る場合の断層折れ曲がり褶曲の幾何学的な形態に対して、その褶曲軸面の角度を決定する一般的な方程式を導いた。実際の地下構造では、スラストアップに伴い上盤の地層内に単純剪断が生じていると考えられるため、これらの結果は地質断面図を作成する上で、非常に重要であると考えられる。またランプの傾斜角が大きいときには、上盤内に単純剪断の存在の可能性が高い事も明らかとなった。さらに重要な点は、衝上断層に伴う褶曲構造が地震探査などの手法によって決まれば、本報告で導いた関係式を用いることで、上盤内で生じている単純剪断を量的に見積もることが可能となった。

ここでは断層折れ曲がり褶曲の幾何学的な特徴について考察を行ったが、今後は、この様な褶曲構造の形成に関する運動学的、力学的な考察を進める事が必要であり、それによって衝上断層系に伴う地下構造の一層の解明が期待できると考えられる。

謝 辞

本稿をまとめるに当たって原稿の段階から重要かつ有益な

ご指摘を頂くと共に、ターミノロジーについて貴重な助言を受けた、徳島大学の村田明広博士にはこの場を借りて感謝します。また日頃から褶曲の形態等について色々と議論頂いている、石油資源開発の浜田康史氏、並川貴俊氏、地球科学総合研究所の西代孝氏にもこの場を借りて深く感謝します。さらに、図式解法に関しては論文査読者より有益な意見を頂いたことに深く謝意を表します。

文 献

- Boyer, S. and Elliott, D. (1982) Thrust System. *AAPG Bulletin*, vol. 66, no. 9, pp. 1196 - 1230.
- Dahlstrom, C. D. A. (1969) Balanced cross section. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 6, pp. 742 - 757.
- Elliott, D. (1976) The energy balance and deformation mechanism of thrust sheets. *Royal Soc. London Philos. Trans.*, ser. A, vol. 283, pp. 289 - 312.
- 垣見俊弘・加藤碩一(1994) 地質構造の解析. 愛智出版, 274 p.
- McClay, K. R. ed. (1992) *Thrust Tectonics*. Chapman & Hill, London, pp.123 - 132.
- Mitra, S. (1992) Balanced Structural Interpretations in Folds and Thrust Belts. S. Mitra and G. W. Fisher eds. *Structural Geology of Fold and Thrust Belts*, The John Hopkins University Press, pp. 53 - 77.
- 村田明広(1988) Balanced Cross Section と Duplex. 地学雑誌, vol. 97, no. 5, pp. 96 - 104.
- 小椋伸幸・葉茸真宝・川田耕司(1994) 北海道空知-エゾ帯白亜系～第三系深部に見られるスラスト・ナップ. 構造地質, no. 40, pp. 43 - 58.
- Poblet, J. and McClay, K. (1996) Geometry and Kinematics of Single-Layer Detachment Folds. *AAPG Bulletin*, vol. 80, no. 7, pp. 1085 - 1109.
- Ramsay, J. G. (1992) Some geometric problems of ramp-flat thrust models. K. R. McClay ed., *Thrust Tectonics*, Chapman & Hill, London, pp. 191 - 200.
- Suppe, J. (1983) Geometry and Kinematics of Fault-Bend Folding. *American Journal of Science*, vol. 283, no. 7, pp. 684 - 721.
- Suppe, J. and Medweff, D. A. (1990) Geometry and Kinematics of Fault-Propagation Folding. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, vol. 83, no. 3, pp. 409 - 454.
- Tearpock, D. J. and Bischke, R. E. (1991) *Applied Subsurface Geological Mapping*. Prentice Hall, New Jersey, 648 p.

付 録 A

(I) 面積の保存則

第 A-1 図において

$$bc=bd=l$$

とする。次に点 c, d より直線 ab に垂線をおろす。褶曲軸面の角度は 2 等分とした為に、角 $\angle cbc'$, $\angle dbd'$ は γ となる。するとこれらの垂線の長さは、各々

$$l \sin \gamma$$

となる事がいえる。すると底辺を共有する三角形 abd と三角形 abc の面積は等しくなる。

第 A-1 図 面積保存則.

(II) 単層の長さの保存則

第 A-2 図より、直線 ac と bd の交点を e とする。すると be の長さは

$$be = \frac{l \sin \theta}{\sin(180^\circ - 2\gamma + \theta)} = \frac{l \sin \theta}{\sin(2\gamma - \theta)} \quad (\text{A-1})$$

となる。次に第 A-3 図より

$$ad = \frac{l \sin \gamma}{\sin(\phi + \gamma - \theta)} \quad (\text{A-2})$$

のため

$$\begin{aligned} ed &= ad \cdot \frac{\sin \phi}{\sin(180^\circ - 2\gamma + \theta)} \\ &= \frac{l \sin \gamma}{\sin(\phi + \gamma - \theta)} \cdot \frac{\sin \phi}{\sin(2\gamma - \theta)} \end{aligned} \quad (\text{A-3})$$

が導ける。いま単層の長さに関する条件式

$$bc=bd=be+ed=l \quad (\text{A-4})$$

に (A-1) 式と (A-3) 式を代入すると

$$l = \frac{l \sin \theta}{\sin(2\gamma - \theta)} + \frac{l \sin \gamma}{\sin(\phi + \gamma - \theta)} \cdot \frac{\sin \phi}{\sin(2\gamma - \theta)} \quad (\text{A-5})$$

が言える。よって次式が成立する (Suppe(1983)(4)式)。

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{\sin \theta}{\sin(2\gamma - \theta)} \\ &+ \frac{\sin \gamma \sin \phi}{\sin(2\gamma - \theta) [\sin \phi \cos(\gamma - \theta) + \cos \phi \sin(\gamma - \theta)]} \end{aligned} \quad (\text{A-6})$$

この式を変形すると最終的に(1)式を得ることができる。

付 録 B

Suppe and Medweff(1990)の(9)式の考察

Suppe and Medweff(1990)の(9)式を以下に示す。

第 A-2 図 ベッドの長さの保存則(1).

第 A-3 図 ベッドの長さの保存則(2).

$$\tan \phi = \frac{-\sin(\gamma - \theta) [\sin(2\gamma - \theta) - \sin \theta]}{\cos(\gamma - \theta) [\sin(2\gamma - \theta) - \sin \theta] - \sin \gamma \left[1 - \frac{\sin \theta \sin \gamma \tan \alpha}{\sin(\gamma - \theta)} \right]} \quad (\text{B-1})$$

残念ながら論文中に (B-1) 式の導出過程は記述されていない。

一方, Mitra(1992)は $\theta = \phi$ で単純剪断 α がある時の関係式を次の形で導いた。

$$\cot \theta = 2 \operatorname{cosec} \beta - \cot \beta - \tan \alpha \quad (\text{B-2})$$

$$\beta = 180^\circ - 2\gamma \quad (\text{B-3})$$

ここで、(B-1)式と(B-2)式を比較検討するため、(B-1)式および(B-2)式を $\cot \gamma$ の形に変形し、 $\theta = \phi$ とし整理すると(B-1)式の時は以下の $\cot \gamma$ に関する3次方程式を得る。

$$A \cot^3 \gamma + B \cot^2 \gamma + C \cot \gamma + D = 0$$

$$A = -3 \tan \theta \sin \theta + 2 \tan \theta \sin^3 \theta + 6 \cos \theta \sin^2 \theta \quad (\text{B-4})$$

$$B = 2 \sin \theta (2 - \cos \theta) - 6 \cos^2 \sin \theta + \tan \theta (\sin \theta \tan \alpha - \cos \theta)$$

$$C = -2 \cos \theta \sin^2 \theta + 2 \cos^3 \theta + \tan \theta \sin \theta$$

$$D = \tan \theta (\sin \theta \tan \alpha - \cos \theta)$$

(B-2)式も(B-3)式の関係を用いて同様に変形すると

$$3 \cos^2 \gamma - 2(\cot \theta + \tan \alpha) \cot \gamma + 1 = 0 \quad (\text{B-5})$$

を得る。明らかに(B-4)式と(B-5)式は異なることが分かる。

要 旨

単純剪断変形が存在する時の断層折れ曲がり褶曲構造に対する幾何学的検討

: 玉川哲也, 松岡俊文, 田村八洲夫

断層が介在する褶曲構造については、衝上断層系の解析を目的として、今までに多くの研究者によって考察が加えられてきた。そして幾何学的な形態及び運動学的な考察から、幾つかの代表的なモデルが提唱されている。現在の所これらは大きく、断層折れ曲がり褶曲、断層伝播褶曲、デタッチメント褶曲に分類されている。

我々はこの論文において、衝上断層の上盤に単純剪断が存在する場合の断層折れ曲がり褶曲に対して、その一般的な形態を導いた。断層のランプの角度が30度を越える場合には、単純な断層折れ曲がり褶曲は存在できないことが示されている。しかしながら単純剪断が上盤の地層に存在する場合には、ランプの角度が30度を越える断層においても、単純な断層折れ曲がり褶曲が形成される可能性がある事がわかった。また、反射地震探査法等によって衝上断層の構造が把握できれば、図式解法によって上盤内で生じている剪断量を定量的に見積もる方法も提示する。

キーワード：断層折れ曲がり褶曲、単純剪断、衝上断層、カットオフ角