論文報告

回転変位と既存条件*

正 会 員 秋 月 春 雄**

Rotational Faulting Displacements and Original Shapes of Veins or Seams

Haruo AKIZUKI

The variations of the strike and the dip of veins or seams on both sides of any faults, depend upon the original shapes of veins or seams before the dislocations and the rotary displacements of the fault walls.

The analytical results of the variations are given in most cases the direction of the rotation of the fault walls. Namely, when the variations of both the strike and the dip beyond the fault coincide with the variations in the rotary displacements, it is determined in a strong probability that the hanging wall of the fault rotates relatively in the direction of the variations, which may be caused by the rotations of the fault walls.

1. 緒 言

鉱脈や地層の形状は目的により一応平面として取扱うことはできるが、厳密には平面でなく一種のねじれ面で、鉱脈によりまた部分によつて、ねじれの程度にも差異がある。その程度が軽微で平面に近いものもあれば、上下左右に漸移的に変化するものもあり、あるいは不規則に時には急激に変化している場合もある。

このような鉱脈や地層の形状は、断層以前に（鉱脈生成後にこれを切る断層を考えているので）既に本来の形状として、すなわち既存条件としてもつていたものである。しかも断層の生起によりその両盤が相対的に移動した後の同一地並は、断層以前の地並とは一般に異なるので、鉱脈や地層がねじれておればたとえ平行移動でも、またそれに回転を伴えばなおさら走向・傾斜の相違を表わすことになる。

およそ一般に既存条件をもたない鉱脈は少なく、また回転を伴わぬ断層移動は一般には存在しない。したがつて断層両側における現実の相違は、両者に程度の差はあつても、一般に既存と回転との両方の効果によるものである。けれども任意の断層事例において、相違に与えている既存と回転の影響比（影響の割合）については、走向・傾斜の対比だけでは判然としない場合がある。これについては別に吟味を要するが、しかし回転がいずれの方向に行なわれたかについては、回転による変化と既存条件との組合わせから起る事象の解析によつて、確率的に推定することができる。

2. 走向の変化から推定される回転の方向

鉱脈や地層の走向に関する既存条件が、仮りに回転のない断層移動の場合に断層先に現われる状態としては、本質的に次の3つの場合しかない。すなわち第1図の平面図において AB は断層線、CD は断層の手前側の、DE は断層先の鉱脈であるとする、(1) のように断層先で左偏向する場合、(2) のように不変の場合、(3) のように右偏向を示す場合の3者である。このうち(2)は特別の場合で起る機会も稀であるから一まず考えない。また図の DE は一般には右あるいは左に離れて食い違ふのであるが、走向の偏向を見易くするために CD の D

第1図
走向の既存条件

と共通に描いたものである。

さて走向の偏向係数¹⁾ $f'(0)$ の値を正数とし、断層上盤の右下向き回転によつて (1), (3) の各場合が受ける変化を (1)', (3)' で示すと第2図ようになる。すなわち $f'(0) > 0, \phi > 0$ であるから断層先の走向はいずれの場合にも左偏向して DF になり²⁾、(1) の変化は (1)' の一つであるが、既存条件と回転量の程度によつて (3)' のように、左偏向はするがもとの走向 θ を越えない(a)の場合と、越えて左偏向する(b)の場合とがある。

さて任意の実例においては既存条件も任意であり、回

* 昭和37年8月21日受理

** 工博 日本精鉱株式会社鉱務部長

第2図 既存条件(走向)の回転による変化

転量も任意である。したがって起る事象の確率は第1表のように左偏向する場合が75%、右偏向の場合が25%である。もし回転の方向が右上向き ($\phi < 0$) の場合には逆に右偏向が75%、左偏向が25%になる。偏向係数 $f'(0)$ が負数の場合にもこの比率は変わらない。

この結果を逆に利用すれば、走向の変化方向から回転の方向を推定することができる。すなわち第3図(a)のように断層先が左偏向している場合に、 $f'(0)$ が正(または負)であれば、断層の上盤が相対的に右下向き(または右上向き)に回転しており、もし(b)のように断層先が右偏向している場合に、 $f'(0)$ が正(負)であれば右上向き(右下向き)回転であると推定しても、その当たる公算は理論上75%である。

しかも稀ではあるが第1図(2)のような場合には、偏向の方向は回転による変化の法則に従うので、かかる場合をも考慮すれば当たる公算は75%以上であるといえよう。

第1表 走向の既存条件と回転変位の確率

既存条件と確率	移動後の偏向方向と確率	総合確率
左偏向の場合(50%)	左偏向する(100%)	50%
右偏向の場合(50%)	左偏向する(50%) 右偏向する(50%)	25% 25%

第4図 断層と鉤脈との走向・傾斜の関係

3. 傾斜の変化から推定される回転の方向

断層の走向・傾斜と鉤脈や地層の走向・傾斜との関係は第4図のような(a)(b)(c)(d)(e)(f)(g)(h)の8つの場合で尽されるが、断層の上盤が右下向きに回転するとき、断層先の鉤脈の傾斜は(a)(c)(f)(h)の各場合には緩傾斜となり、その他の(b)(d)(e)(g)の各場合には急傾斜に変化する。逆に上盤が右上向きに回転するとき、それぞれ上記とは反対の変化をする。

さて断層に回転運動を伴う場合、断層先の鉤脈の傾斜が緩傾斜になるか、急傾斜に変化するかの区別は、正確には $g'(0) = -\sin\theta\sin\alpha^{1)}$ の符号によつて判別されるけれども、その結果は上記第4図で判断した結果にほとんど一致するので、回転による傾斜の変化については、回転の方向と断層の手前側における鉤脈の傾斜の方向とによつて容易に判定することができる。

さて既存条件としての傾斜が、仮りに回転のない断層移動の場合に断層先に現われる状態としては、本質的には次の3つの場合しかない。すなわち第5図の平面図においてABは断層線、CDは断層手前側、D'Eは断層先の鉤脈であるが、(1)のように断層先の傾斜が手前側のそれよりは急傾斜を示す場合、(2)のように無変化の場合および(3)のように急傾斜になる場合の3つである。この関係は断層の傾斜の方向にかかわらず、また鉤脈の走向・傾斜の方向を問わず成り立つものである。

いま傾斜の緩急の比較を便利にするために第5図における関係を、特定の数値を用いて示せば第6図のようになる。ここに(2)の無変化の場合は特別の場合で、起る機会も稀であるから以下の考察では一まず取上げない。また断層の傾斜の方向はどちらであつても総合結果に変わりはないので、向こう落ちの場合で考える。

第5図 傾斜の既存条件

第6図 傾斜の既存条件の一例

そこで上記の第6図の(1)および(3)が、断層の上盤の右下向き回転によつて受ける変化を、(1)'および(3)'で示せば第7図のようになる。(1)'は回転がなくても既存条件として、断層先の傾斜が手前側に比べて緩傾斜になる条件であるから、上盤の右下向き回転によつてさらに緩傾斜の例えば 45° になる。(3)'においては回転移動以前の既存条件として、断層先の傾斜が手前側に比べて急傾斜である。これが右下向き回転を伴うと緩傾斜になるのであるが、その程度が手前側の傾斜を越えない(a)の場合と、越えて緩傾斜になる(b)の場合とがある。

さて任意の実例においては既存条件としての傾斜も任意であり、回転量も任意である。したがって起る事象の確率は第2表のように、緩傾斜になる場合が75%、急傾斜になるのが25%である。もし鉱脈の傾斜が下向きの場合(第4図b)には、反対に急傾斜になる場合が75%で緩傾斜になるのが25%である。鉱脈の走向角 θ が鈍角の場合でもこの比率は変わらない。断層の傾斜が手前落ちの場合でもこの比率は不変である。これを要約すれば、傾斜に既存条件をもつ鉱脈や地層が回転断層によつて受ける断層先の傾斜の変化は、

(i) 断層先が急傾斜になる方向に回転すると、急傾斜になる確率が75%である。

第8図 走向・傾斜の既存条件

第2表 傾斜の既存条件と回転変位の確率

既存条件と確率	移動後の傾斜と確率	総合確率
緩傾斜の場合(50%)	緩傾斜になる(100%)	50%
急傾斜の場合(50%)	緩傾斜になる(50%) 急傾斜になる(50%)	25% 25%

(ii) 断層先が緩傾斜になる方向に回転すると、緩傾斜になる確率が75%である。

この結果を逆に利用すれば、鉱脈の傾斜の変化状態から、断層の上盤側の相対的な回転の方向を確率的に推定することができ、その当たる公算は理論上75%である。

しかも稀ではあるが既存条件のない場合、もしくはあつてもそれが無いのと同じ結果を表わす場合には、変化は回転の法則に従うので、このような場合をも考慮すると上記の公算は75%以上であるといえよう。

4. 走向・傾斜の総合変化から 推定される回転の方向

走向・傾斜に関する既存条件が、仮りに回転のない断層移動の場合に、断層先に現われる姿としては、第8図の9個の場合で代表される。ここでは便宜上傾斜に特定の数値を用いたが、図のように走向が左偏向している場合(上段)、不変の場合(中段)、右偏向の場合(下段)で、これに傾斜が手前側よりも緩い場合(左側)、不変の場合(中の列)、急な場合(右列)である。このうち(2)(4)(5)(6)(8)の5つは起る公算が比較的に少ないので、実質的には四隅の(1)(3)(7)(9)の4つの場合で代表される。

そこでこの4つの場合について $f'(0)$ の値が正数で、

	(a)	(b)	(c)	(d)
(1)'				
(3)'				
(7)'				
(9)'				

第9図 既存条件の回転による変化

第3表 走向・傾斜の既存条件と回転変位の確率

既存条件	確率	回転後の変化	確率	総合確率	各場合の起る確率
(1)	%	(1)'(a)	⊕	%	%
	25	(1)'(a)	⊕	100	25.00
		(3)'(a)	⊕	50	12.50
		(3)'(b)	⊕	50	12.50
		(7)'(a)	⊕	50	12.50
		(7)'(b)	⊕	50	12.50
		(9)'(a)	⊕	25	6.25
		(9)'(b)	⊕	25	6.25
		(9)'(c)	⊕	25	6.25
		(9)'(d)	⊕	25	6.25

断層の上盤側が右下向き回転の場合を考えると、とにかく走向は今よりは左に、傾斜はさらに緩くなるが既存条件と回転量の程度によってその変化が、(1)は第9図の(1)'の一つの場合しかないけれども、(3)(7)はそれぞれ(3)'(7)'の(a)(b)各2つに、(9)は(9)'の(a)(b)(c)(d)の4つの場合に分かれる。

この結果において走向・傾斜の変化とともに、回転による変化に同調するものには⊕の印を、いずれか一方だけしか合わない場合は⊗、両方とも合わないものには⊖の印をつけると図のようになる。

さて任意の実例においては既存条件も任意であり、回転量も任意である。したがって断層先に現われる事象の確率は第3表のようになる。すなわち⊗の場合が37.5%で⊕⊖合わせて62.5%である。回転の方向が右上向きの場合でもこの比率は変わらない。また偏角係数 $f'(0)$ の値が負数の場合でもこの比率は不変である。断層現象の多くの実例を調査して統計すると⊗の事例が約35%、⊕の事例が約65%である*。これはこの確率的推定の結果とほぼ一致する。

さて⊖の現象は形式としては一定方向に回転した外観を示している。そこで⊗の場合を除外して⊕⊖の場合だけを考えると、⊕の場合の起る確率は90%で、⊖の場合は10%に過ぎない。

この結果を逆に利用すれば、回転の方向を確率的に推定することができる。すなわち任意の実例において走向・傾斜の変化が第10図のように、回転による変化の方向に同調する⊕の場合には、断層の上盤側が相対的にその変化を満足する方向へ回転していると想定しても、その当たる公算は理論上90%であるといえる。

しかも稀ではあるが第8図の(2)(4)(6)(8)の4つの場合には⊖がない。また(5)の場合の変化は正しく

第10図 走向・傾斜の変化と回転方向との関係

回転による変化の法則に従うので、このような場合をも考慮すれば当たる公算は90%以上であるといえよう。

5. 既存条件の判定

まず、回転断層による鉤脈や地層の走向・傾斜の変化の解析³⁾について簡単にのべると、断層面も鉤脈や地層の面も一応平面とみなして、傾斜角 α の断層で切られる地層や鉤脈の走向を表わす角を θ 、傾斜を β とし、この断層が回転角 ϕ の回転移動によって変化する断層先の走向・傾斜を θ', β' とすれば、

$$\theta' = \tan^{-1} \left(\frac{a \sin \phi + c \cos \phi}{a \cos \phi \cos \beta - c \sin \phi \sin \beta} \right) \dots (1)$$

$$\beta' = \cos^{-1} (-a \sin \alpha \cos \phi + c \sin \alpha \sin \phi + b \cos \alpha) \dots (2)$$

ここに、

$$a = \cos \theta \cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta$$

$$b = \cos \theta \sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \cos \beta, \quad c = \sin \theta \sin \beta$$

さて仮りに断層先の走向・傾斜を表わす角 θ', β' が既知であるとき、断層の手前側の走向・傾斜を表わす角 θ, β は、上記(1)(2)の式において α, β, ϕ の符号を変えることにより次のように表わせる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{-a' \sin \phi + c' \cos \phi}{a' \cos \phi \cos \beta' + c' \sin \phi \sin \beta'} \right) \dots (3)$$

$$\beta = \cos^{-1} (-a' \sin \alpha \cos \phi - c' \sin \alpha \sin \phi + b' \cos \alpha) \dots (4)$$

ここに、

$$a' = \cos \theta' \cos \alpha \sin \beta' - \sin \alpha \cos \beta'$$

$$b' = \cos \theta' \sin \alpha \sin \beta' + \cos \alpha \cos \beta', \quad c' = \sin \theta' \sin \beta'$$

である。次に(3)から回転角 ϕ を求めると³⁾

$$\phi = 2 \tan^{-1} \left(\frac{l' \pm \sqrt{k'^2 + l'^2 - m'^2}}{k' + m'} \right)$$

ここに、 $k' = a' \cos \alpha \tan \theta - c'$ 、 $l' = c' \cos \alpha \tan \theta - a'$ 、 $m' = -b' \sin \alpha \tan \theta$ である。また(4)から回転角 ϕ を求めると、

* 実例約250の統計

$$\phi = 2 \tan^{-1} \left(\frac{q' \pm \sqrt{p'^2 + q'^2 - r'^2}}{p' + r'} \right)$$

ここに、 $p' = a' \sin \alpha$, $q' = c' \sin \alpha$, $r' = b' \cos \alpha - \cos \beta$ である。

以上の解析を参考にして既存条件の判定を試みると次のようになる。断層先の状態については、鉤脈や地層の既存条件としての走向・傾斜を θ_0, β_0 とし、傾斜角 α の断層の回転移動 (回転角 ϕ_0) によつて、断層先の走向・傾斜が θ', β' に変化したものと考え、 $\phi_0, \theta_0, \beta_0$ のうちいずれか一つがわかれば、他の2要素は計算によつて知ることができる。すなわち

(1) 回転角 ϕ_0 がわかる場合

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{-a' \sin \phi_0 + c' \cos \phi_0}{a' \cos \alpha \cos \phi_0 + c' \cos \alpha \sin \phi_0 + b' \sin \alpha} \right)$$

$$\beta_0 = \cos^{-1} (-a' \sin \alpha \cos \phi_0 - c' \sin \alpha \sin \phi_0 + b' \cos \alpha)$$

(2) 走向を表わす角 θ_0 がわかる場合

$$\phi_0 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{l' \pm \sqrt{k'^2 + l'^2 - m'^2}}{k' + m'} \right)$$

$$k' = a' \cos \alpha \tan \theta_0 - c', \quad l' = c' \cos \alpha \tan \theta_0 - a'$$

$$m' = -b' \sin \alpha \tan \theta_0$$

$$\beta_0 = \cos^{-1} (-a' \sin \alpha \cos \phi_0 - c' \sin \alpha \sin \phi_0 + b' \cos \alpha)$$

(3) 傾斜角 β_0 がわかる場合

$$\phi_0 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{q' \pm \sqrt{p'^2 + q'^2 - r'^2}}{p' + r'} \right)$$

$$p' = a' \sin \alpha, \quad q' = c' \sin \alpha, \quad r' = b' \cos \alpha - \cos \beta_0$$

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{-a' \sin \phi_0 + c' \cos \phi_0}{a' \cos \alpha \cos \phi_0 + c' \cos \alpha \sin \phi_0 + b' \sin \alpha} \right)$$

回転運動を伴わない特別の場合には $\phi_0 = 0$ であつて、したがつて $\theta_0 = \theta', \beta_0 = \beta'$ となり、断層先の走向・傾斜それぞれ自身が既存条件になる。また $\beta_0 = \beta', \theta_0 = \theta'$ となる場合には、既存条件は軽微で ϕ_0 自身がその回転角である。

6. 結 言

断層の両側における鉤脈や地層の走向・傾斜の相違は、

主として鉤脈や地層の本来の形状 (既存条件) と断層の両盤と相対的回転運動とにある。この変化を解析すると断層両盤の相対的回転運動の方向を確率的に推定することができる。すなわち

(1) 断層先の鉤脈や地層の走向が左偏向 (または右偏向) していて、

(i) $f'(0) > 0$ であれば、この断層の上盤側は相対的に右下向き (または右上向き) に回転している場合が多く、その公算は75%以上である。

(ii) $f'(0) < 0$ であれば、右上向き (または右下向き) に回転の公算が75%以上である。

(2) 断層の両側における鉤脈や地層の傾斜の変化はその変化を満足する方向に、断層の上盤側が相対的に回転している場合が多く、その公算は75%以上である。

(3) 断層先の鉤脈や地層の走向・傾斜が両方とも、回転による変化の方向に一致するときは、断層の上盤側が相対的にその変化を満足する方向に回転している場合が多く、その公算は90%以上である。

また、回転角ならびに既存条件としての走向・傾斜の3要素のうち、いずれか一つがわかれば他の2要素は計算によつて知ることができる。

謝辞：この研究およびこれに関連した断層に関する研究には、京都大学教授滝本清博士ならびに平松良雄博士から宏深なる御指導を賜つた。また電子計算機の操作には東京理科大学林健児先生に、断層の実例調査に当つては多くの鉱山事業所の方々から御援助をいただいた。ここに厚く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 秋月春雄：回転断層の判定法，日本鉱業会誌，78巻，891号，昭和37年9月，633頁
- 2) 秋月春雄：回転断層による走向の偏向方向の確率，日本鉱業会誌，79巻，896，号昭和38年2月，83頁
- 3) 秋月春雄：断層の解析，鉱山地質，Vol. 11, No. 45~46 1961, pp. 28~30.