

断裂面上の条線の方向から主応力軸の方向および R値を計算する方法の改良

山田 悠三* 阪口 圭一*

YAMADA, Eizo and SAKAGUCHI, Keiichi (1991) Revised method to compute principal stress directions and R-values from striations on fracture planes. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 42(10), p. 503-515, 6 fig., 3 tab.

Abstract: Methods to calculate principal stress directions and R-values $\left[\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \right]$ by means of the minimization of the square sum of angles between the directions of striations and maximum shear stresses on fracture planes, have recently been used by several geologists. However, whether a fracture plane slips under a given stress field or not depends on the maximum shear stress and the normal stress on the plane and on the mechanical character of the fracture plane.

Therefore, it is necessary to take into account whether the planes are easy to slip in the directions of maximum shear stresses in determining the optimal directions of principal stresses and R-values. In the present program, weight functions derived from the maximum shear stresses and the normal stresses on the planes were multiplied by the angles between the directions of striations and maximum shear stresses and their square sum was minimized, while the mechanical character of the fracture planes was taken to be constant on all planes.

The striations on the fracture planes measured in the southern part of the Izu Peninsula were processed using this program. The complex striations were better grouped into several sets formed under different stress fields by this method than by the previous one.

要 旨

数多くの断裂面の方向およびその面上の条線の方向を測定し、そのような条線を生じさせた主応力軸の方向およびR値 $\left[\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \right]$ を、その断裂面上に作用する最大剪断応力の方向と条線の方向のなす角度の二乗和を最小にすることによって求める方法が近年報告されている。しかし、断裂面がすべりやすいかどうかは、断裂面上に作用する垂直応力と最大剪断応力の大きさおよび断裂面の力学的性質に依存しているため、断裂面がすべりやすいかどうかとも考慮して、最適な主応力軸の方向およびR値を選ぶ必要がある。ここでは断裂面の力学的性質は一定とし、断裂面上に作用する最大剪断応力と垂直応力にもとづいた重み関数を乗じるにより、断裂面のすべりやすさを考慮した。このようにすべりやすさを考慮に入れて伊豆半島南部の断裂面上の条線を解析した結果、従来の方法より正しく複雑な条線群をいくつかの応力場で生

じた条線の組に区分出来ることが明らかになった。

1. ま え が き

断裂面上にみられる条線は、その条線が生じた時の応力場により断裂面上に作用した最大剪断応力の方向をほぼ示していると考えられる。この最大剪断応力の方向は主応力の方向のみでなくR値、すなわち $\left[\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \right]$ の値¹⁾ (ここで $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ はそれぞれ主圧縮応力の値で $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) により変化し、それにより傾斜移動断層 (Oblique slip fault) が生ずることが Bott (1959) により示された。最近、このことを逆に利用し、すなわちいくつかの異なる方向の断裂面上にみられる条線が同一の応力場で生じたと考え、それらの各断裂面に作用する最大剪断応力の方向と条線のなす角度の二乗和を最小にする主応力軸の

¹⁾ Etchecopar *et al.* (1981) では $R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ としており、ここで定義したRは(1-R)となる。Angelier (1989) は Etchecopar のR値は Φ と呼ぶべきだと主張している。

Keywords: fracture, striation, stress field, R-value, computer program, Izu

* 地殻熱部

方向および R 値を求める方法 (Etchecopar *et al.*, 1981; Angelier *et al.*, 1982; など) が提案され, 古応力場の復元に用いられている (Angelier, 1989). しかし断裂面が実際最大剪断応力の方向へずるかどうかは, 断裂面上に作用する垂直応力 (σ_n) と剪断応力 (τ) および断裂面の摩擦抵抗, 粘着力などの力学的性質に依存している.

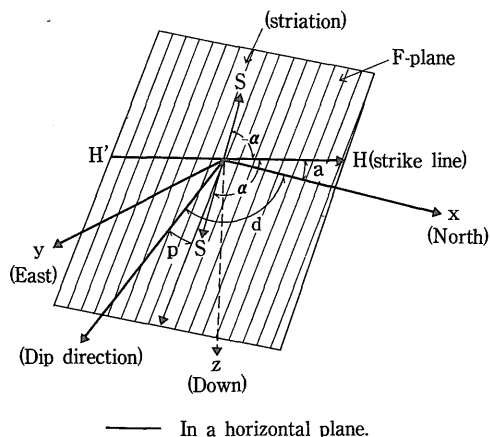
そこで, 今回開発したプログラムの基本的な考え方は, Bott (1959) および Etchecopar *et al.* (1981) により報告されたものによったが断裂面のすべりやすさも考慮に入れて, 最適な主応力軸の方向および R 値を求めるように改良した. 本プログラムは, 主応力軸の方向および R 値を少しずつ変化させた場合に, それぞれの断裂面上に作用する最大剪断応力の方向および各断裂面のすべりやすさの重み付けの値を計算し, 最大剪断応力の方向と対応する各断裂面上の実際に測定された条線方向とのなす角度にすべりやすさの重み付けの値を乗じた値の二乗の平均値を最小にする主応力軸の方向および R 値を選び出すものである. 本プログラムでは, 測定された断裂面上の条線のうちある与えられた割合のものが同一の応力場で形成されたものとし, その場合の最大剪断応力の方向と条線方向のなす角度にすべりやすさの重み付けの値を乗じた値の二乗の平均値を最小にするような, 主応力軸の方向, R 値および断裂面の組合せを選ぶようにした. この場合, どのような割合が同一応力場で形成されたのかは未知なのでいろいろな割合について計算を行い, その結果をもとにどれが適当か判断するようにした. さらに逆に計算された主応力軸の方向ないし他のデータから主応力軸の方向が分かっている場合にはその値と実際に測定された条線方向から, 各断裂について R 値を計算したり, 計算された R 値ないしは適当な R 値を与え最大剪断応力の方向を求め, 実際の条線方向との違いなども検討できるようにした. また, 測定された断裂面上の条線は移動のセンスを判定することが困難な場合も多いので, そのようにセンスが不明なものについては, 両方のセンスをとれるものと仮定して最大剪断応力とのなす角度を求められるようにした.

本プログラムを用いて伊豆南部の断裂面上の条線群を処理した結果, 従来の方法よりもうまく複雑な条線群をいくつかの応力場で生じた条線の組に区分できた.

2. 主応力軸の方向と 1 つの断裂面上の条線方向から R 値を計算する方法および逆に R 値を与え最大剪断応力の方向を計算する方法

2.1 測定値

ここでは主応力軸の方向が他のデータから与えられて



第 1 図 x, y, z 座標軸の配置, 断裂面 (F-plane) 内における条線方向の角度 Rake (α) の定義, および断裂面の走向 (a)・傾斜 (p) および傾斜の方位角 (d) の定義

Fig. 1 Definition of x, y, z-coordinate axes with respect to the geographical reference frame, of the rake (α) of striations, and of the strike (a), the dip (p), the azimuth of dip direction (d) of the fracture plane.

いるものとし, 1 つの断裂面の方向とその断裂面上の条線方向が測定されているものとする.

a) 断裂面の走向は北からの角度 (a°) と東 (E) ないし西 (W) の向きの記号で与えられ, 傾斜は水平面からの角度 (p°) およびその向きの記号 (E, W, N, S, NE, SW, NW ないし SE) で与えられるものとする.

走向が東西および南北の場合はそれぞれ角度 90° および 0° を与え, 向きの記号は与えない (ブランク) でよい. 傾斜が 0° の場合, 走向は不定だが, 仮に 0° を与えるものとする.

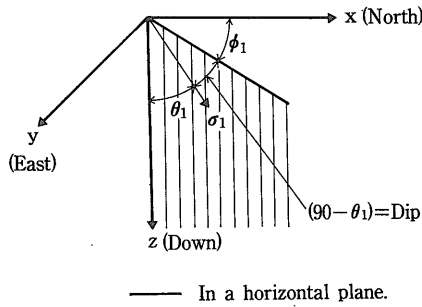
傾斜が垂直および水平の場合は, それぞれ角度 90° および 0° を与え, 向きの記号は与えない (ブランク) でよい.

$$0^\circ \leq a^\circ \leq 90^\circ \quad 0^\circ \leq p^\circ \leq 90^\circ$$

b) 条線方向は Rake (α°) で与えられたものとする (第 1 図).

Rake は走向線の北向き方向 (ただし走向が東西の場合は東) と条線方向のなす角度とし, 水平面から下方を正, 上方を負とする. 断裂面が水平の場合は北をゼロとし東回りに正, 西回りに負とする. 移動のセンスは下盤側 (Foot Wall), ただし, 断裂面が垂直の場合²⁾ は北側

²⁾ 山田 (1980) においては, 断裂面が垂直の場合南側のブロック, また, 断裂面が垂直で南北の場合は西側のブロックの移動方向としたが, 正の方向のブロックの移動方向に統一する為, 今回定義を変更した.



第2図 主応力軸 σ_1 の方向に係る方位角 (ϕ_1), z 軸とのなす角度 (θ_1) と xyz -座標軸との関係

Fig. 2 Definitions of the azimuth angle (ϕ_1) of the principal stress direction and of angle (θ_1) between z -axis and the principal stress direction with respect to the x, y, z -coordinate axes.

のブロックまた、断層が垂直で南北の場合は東側のブロック、の移動方向とする。

$$-180^\circ \leq \alpha' \leq +180^\circ$$

センスが不明の場合は $\alpha' = \alpha \pm 180^\circ$

c) 主応力軸を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) として圧縮を正とする。主応力軸の方向は方位角 ϕ_i と z 軸からの角度 θ_i ($i=1, 2, 3$) であらわされる (第2図)。

主応力軸の方向については、1つの主応力軸の方位角 (ϕ_a) と Z 軸からの角度 (θ_a) および2つ目の主応力軸の方位角 (ϕ_b) ないし Z 軸からの角度 (θ_b) を与えれば決定される。ただし、それぞれ2つの解があるのでどちらか一方に特定する必要がある。また θ_a が 0° で θ_b が 90° の場合は、 ϕ_b を与える必要が、 $\theta_a = 90^\circ$ で $\phi_a = \phi_b \pm 90^\circ$ の場合は、 θ_b を与える必要がある。

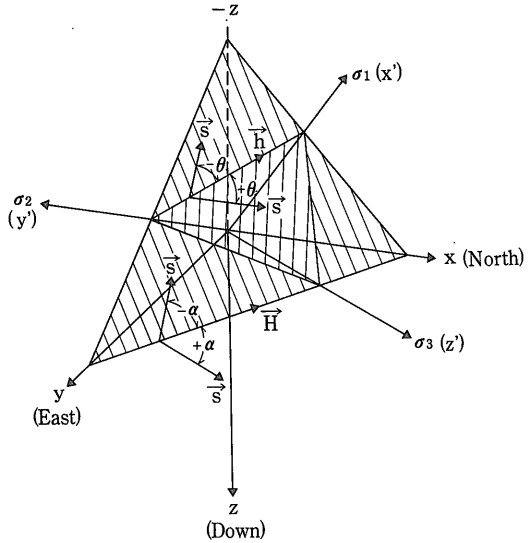
2.2 計算法

Bott (1959) は主応力軸が x -軸, y -軸, z -軸に一致している場合、断層面のポールの単位ベクトルを \vec{n} (l, m, n), それぞれの軸方向の主応力の値を $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, また、与えられた断層面内における最大剪断応力の方向と断層面と xy -平面の交線のうち x が正の方向の単位ベクトル \vec{h} とのなす角度を θ とすれば、

$$\tan \theta = \frac{n}{lm} \{ m^2 - (1 - n^2) \frac{\sigma_z - \sigma_x}{\sigma_y - \sigma_x} \} \dots \dots (1)$$

の関係があることを示した。

主応力軸が x -軸, y -軸, z -軸に一致していない一般の応力状態の場合、断層面の走向と与えられた断層面内における最大剪断応力の方向のなす角度を求めるには、 x -



第3図 断層面の走向の単位ベクトル (\vec{H}), 条線の単位ベクトル (\vec{s}), Rake (α) ならびに $\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$ -座標 ($x' y' z'$ -座標) における断層面と σ_2 -座標軸との交点から σ_1 -座標軸との交点の方向への単位ベクトル (\vec{h}) および条線方向が \vec{h} の方向となす角度 (θ) の定義

Fig. 3 Definitions of the unit vector (\vec{H}) of the strike of fracture plane, of the unit vector (\vec{s}) of striations, of rake (α), of the unit vector (\vec{h}), which is the direction from the cross point of σ_2 -axis with the fracture plane to the cross point of σ_1 -axis with the fracture plane, and of the angle (θ) between \vec{s} and \vec{h} . σ_1, σ_2 and σ_3 axes correspond to the directions of principal stresses.

軸, y -軸, z -軸を座標回転により主応力軸の方向に一致させ、その状態での θ を計算し、その θ から断層面の走向方向と最大剪断応力の方向との角度 α を計算すればよい。ここで、 x -, y -, z -座標は、それぞれ北、東および下方を正とした右手系を用い、主応力軸座標についても同様に右手系を用いる (第3図)。

a) 走向・傾斜データから傾斜の方位角 (d') を求める。

傾斜の方位角 (d') は、第1表に示した走向・傾斜の記号の各組合せ毎に、走向の値 (a') よりそれぞれ下記の式で求められる。

第1表で1の組合せは、	$90^\circ - a'$,
” 2 ”	$a' + 90^\circ$,
” 3 ”	$90^\circ - a' + 180^\circ$,
” 4 ”	$a' + 90^\circ + 180^\circ$,
” x ”	不可能な組み合わせ

(データエラー),

傾斜がゼロの場合は、不定。

- b) 傾斜 (p°) と傾斜の方位角 (d°) よりポールの単位ベクトル \vec{n} (n_x, n_y, n_z) を求める。

$$\begin{aligned} n_x &= \sin(p^\circ) \cos(d^\circ) \\ n_y &= \sin(p^\circ) \sin(d^\circ) \\ n_z &= \cos(p^\circ) \end{aligned} \quad \left(\begin{array}{l} 0^\circ \leq p^\circ \leq 90^\circ \\ 0^\circ \leq d^\circ < 360^\circ \end{array} \right)$$

ただし、一つの面には2つの互いに反対方向のポールがある。ここでは、下向き、水平の場合は北向き、水平で東西の場合は東向きのポールを選ぶものとする。したがって、 $n_z < 0$ 、ないし $n_z = 0$ で $n_x < 0$ 、ないし $n_y = 1$ の場合は、 $\vec{n}(-n_x, -n_y, -n_z)$ とする。

- c) 走向方向の単位ベクトル \vec{H} (H_x, H_y, H_z) を求める。

ただし (\vec{H}) は北方向きのものを用い、東西の場合は東 (E) 方向のものを用いる。

$$\begin{aligned} H_x &= \cos(a^\circ) & (0^\circ \leq a^\circ \leq 90^\circ) \\ H_y &= \sin(a^\circ) \text{ (走向 E の場合および } a^\circ = 90^\circ \text{ の場合)} \\ H_y &= -\sin(a^\circ) \text{ (走向 W の場合)} \\ H_z &= 0^\circ \end{aligned}$$

傾斜が 0° の場合は走向は不定だが仮に真北方向を走向とする。

- d) 条線方向の単位ベクトル \vec{s} (s_x, s_y, s_z) を求める。

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot \vec{s} &= n_x s_x + n_y s_y + n_z s_z = 0 \quad (-180^\circ < a^\circ \leq 180^\circ) \\ \vec{H} \cdot \vec{s} &= H_x s_x + H_y s_y = \cos(a^\circ) \\ s_x^2 + s_y^2 + s_z^2 &= 1 \end{aligned}$$

ただし、 $a^\circ > 0$ のとき $s_z > 0$ 、 $a^\circ < 0$ のとき $s_z < 0$ とする。また、 $n_z = 1$ の場合、 $a^\circ > 0$ のとき $s_y > 0$ 、 $a^\circ < 0$ のとき $s_y < 0$ とする。

- e) 主応力軸 (σ_a) の方位角 (ϕ_a) と z 軸からの角度 (θ_a) から単位ベクトル $\vec{\sigma}_a$ (x_a, y_a, z_a) を求める。

$$\begin{aligned} x_a &= \sin(\theta_a) \cos(\phi_a) \\ y_a &= \sin(\theta_a) \sin(\phi_a) \\ z_a &= \cos(\theta_a) \end{aligned} \quad \left(\begin{array}{l} 0^\circ \leq \phi_a < 180^\circ \\ 0^\circ \leq \theta_a < 180^\circ \end{array} \right)$$

- f) 主応力軸 (σ_b) の方位角 (ϕ_b) と単位ベクトル $\vec{\sigma}_a$ から、単位ベクトル $\vec{\sigma}_b$ (x_b, y_b, z_b) を求める。

$$\begin{aligned} \vec{\sigma}_a \cdot \vec{\sigma}_b &= x_a x_b + y_a y_b + z_a z_b = 0 \\ \vec{\phi}_b \cdot \vec{\sigma}_b &= \sin(\phi_b) x_b - \cos(\phi_b) y_b = 0 \\ x_b^2 + y_b^2 + z_b^2 &= 1 \end{aligned}$$

ただし、 $0 \leq \phi_b < 180^\circ$ の場合 $y_b \geq 0$ 、 $180 \leq \phi_b < 360^\circ$ の場合 $y_b \leq 0$ 。

- g) 主応力軸 (σ_b) の z 軸からの角度 (θ_b) と単位ベクトル $\vec{\sigma}_a$ から、単位ベクトル $\vec{\sigma}_b$ (x_b, y_b, z_b) を求める。

$$\begin{aligned} \vec{\sigma}_a \cdot \vec{\sigma}_b &= x_a x_b + y_a y_b + z_a z_b = 0 \\ \vec{z} \cdot \vec{\sigma}_b &= z_b = \cos \theta_b \\ x_b^2 + y_b^2 + z_b^2 &= 1 \end{aligned}$$

ただし、 $0 \leq \phi_b < 180^\circ$ の場合 $y_b \geq 0$ 、 $180 \leq \phi_b < 360^\circ$

第1表 走向・傾斜データと傾斜の方位角の関係。詳細については本文参照。

Table 1 Relationship between strike & dip and the azimuth of dip direction (d°). See text for explanation.

Dip symbol \ Strike symbol	E	W	0°	90°
N	4	1	X	0°
E	2	1	90°	X
S	2	3	X	180°
W	4	3	270°	X
NE	X	1	X	X
SW	X	3	X	X
NW	4	X	X	X
SE	2	X	X	X
90°	2 & 4	1 & 3	90° 270°	0° 180°
0°	Undeterminable			

の場合 $y_b \leq 0$ 。

- h) 単位ベクトル $\vec{\sigma}_a$ と $\vec{\sigma}_b$ から $\vec{\sigma}_c$ (x_c, y_c, z_c) を求める。

$$\begin{aligned} \vec{\sigma}_c &= \vec{\sigma}_a \times \vec{\sigma}_b \\ x_c &= y_a z_b - z_a y_b \\ y_c &= -(x_a z_b - z_a x_b) \\ z_c &= x_a y_b - y_a x_b \end{aligned}$$

ただし、($a=2, b=1$)、($b=2, a=3$) および ($b=3, a=1$) の場合には、右手系になるようにするため、 x_c, y_c および z_c の符号をつけかえる。

- i) 単位ベクトル $\vec{\sigma}_b$ と $\vec{\sigma}_c$ を方位角 (ϕ_b, ϕ_c) と z 軸からの角度 (θ_b, θ_c) に変換。

$$\begin{aligned} \theta_b &= \cos^{-1}(z_b) \\ \phi_b &= \tan^{-1}(y_b/x_b) \end{aligned}$$

ただし、 $x_b < 0$ の場合は $\phi_b = \phi_b + 180^\circ$ 、 $x_b > 0, y_b < 0$ の場合は $\phi_b = \phi_b + 360^\circ$ 。また、 $x_b = 0, y_b > 0$ の場合は $\phi_b = 90^\circ$ 、 $x_b = 0, y_b < 0$ の場合 $\phi_b = 270^\circ$ 、 $z_b = \pm 1$ の場合 θ_b は不定となる。

- j) 断层面と $\sigma_1 \sigma_2$ -平面との交線で σ_1 が正の向きの、ただし断层面が σ_1 軸に平行でなく σ_2 軸に平行な場合は、 σ_2 が正の向きの方向の単位ベクトル \vec{h} (h_x, h_y, h_z) を求める。

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot \vec{h} &= n_x h_x + n_y h_y + n_z h_z = 0 \\ \vec{\sigma}_3 \cdot \vec{h} &= x_3 h_x + y_3 h_y + z_3 h_z = 0 \\ h_x^2 + h_y^2 + h_z^2 &= 1 \end{aligned}$$

ただし, $\sigma_1 \cdot \vec{h} < 0$ の場合, および $\sigma_1 \cdot \vec{h} = 0$ で $\sigma_2 \cdot \vec{h} < 0$ の場合, 符号をを付けかえる. $\sigma_3 = \bar{n}$ の場合は, $\vec{h} = \sigma_1$ とする.

k) 断裂面のポールの単位ベクトル $\vec{n}(n_x, n_y, n_z)$ を主応力軸座標 (σ_1 , σ_2 , σ_3 -座標) に座標変換して変換した座標での表示 $\vec{n}(l, m, n)$ を求める.

$$\begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}$$

l) 単位ベクトル $\vec{h}(h_x, h_y, h_z)$ と $\vec{s}(s_x, s_y, s_z)$ のなす角度 θ を求める.

$$\vec{h} \cdot \vec{s} = h_x s_x + h_y s_y + h_z s_z = \cos(\pm \theta) \quad (0^\circ \leq \theta \leq +180^\circ)$$

$$\theta = \cos^{-1}(h_x s_x + h_y s_y + h_z s_z)$$

ただし $\sigma_3 \cdot \vec{s} < 0$ の場合には, θ の符号は負となる. $\sigma_3 \cdot \vec{s} = 0$ の場合は, $(\vec{h} \times \vec{s}) \cdot \sigma_3 < 0$ の場合に θ の符号は負となる.

m) R値すなわち $\left[\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \right]$ の値を求める. $(0 \leq R \leq 1)$

(1)式より,

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} = (1 - n^2) / \left\{ m^2 - \left| \frac{lm}{n} \right| \tan(\theta) \right\}$$

$lm < 0$ の場合は, $\tan(\theta)$ が $-\tan(\theta)$ となるので $\left| \frac{lm}{n} \right|$ におきかえる.

$lmn = 0$ の場合, すなわち断層面が σ_1, σ_2 ないし σ_3 軸に平行な場合はR値は不定となる.

$\theta = \pm 90^\circ$ の場合は, R値は0となる.

$m^2 = \frac{lm}{n} \tan(\theta)$ の場合は, $R = \infty$ となる.

また, $\theta < 0$ の場合は与えられた応力配置からあり得ない.

n) R値および主応力軸座標における断裂面のポールの単位ベクトル $\vec{n}(l, m, n)$ より最大剪断応力の方向 $\vec{\tau}$ と \vec{h} のなす角度 θ を求める.

(1)式より,

$$\theta = \tan^{-1} \left[\left| \frac{n}{lm} \right| \left\{ m^2 - (1 - n^2) \left[\frac{1}{R} \right] \right\} \right] \quad (-90^\circ \leq \theta \leq 0^\circ)$$

I $l > 0, m > 0, n > 0$ の場合, $\theta = \theta + 180^\circ$

II $l > 0, m < 0, n > 0$ の場合, $\theta = \theta + 180^\circ$

$$90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$

III $l > 0, m > 0, n < 0$ の場合, $\theta = -\theta$

IV $l > 0, m < 0, n < 0$ の場合, $\theta = -\theta$

V $l < 0, m > 0, n > 0$ の場合, $\theta = -\theta$

VI $l < 0, m < 0, n > 0$ の場合, $\theta = -\theta$

(すなわち $lm < 0$ の場合) $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

VII $l < 0, m > 0, n < 0$ の場合, $\theta = \theta + 180^\circ$

VIII $l < 0, m < 0, n < 0$ の場合, $\theta = \theta + 180^\circ$

$$90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$

l, m, n のうち1つが1の場合, すなわち $\sigma_1 \sigma_2$, $\sigma_2 \sigma_3$, $\sigma_1 \sigma_3$ -平面が断裂面の場合, θ は不定.

$n = 0, l \neq 0, m \neq 0$ の場合, すなわち断裂面が σ_3 軸に平行な場合, $\theta = 180^\circ$.

l , ないし m がゼロで $n \neq 0$ の場合, すなわち断裂面が σ_1 軸ないし σ_2 軸に平行の場合は, $\theta = 90^\circ$.

$R = 0$ の場合, すなわち $\sigma_1 = \sigma_2$ の場合は, $\theta = +90^\circ$.

o) θ より最大剪断応力の単位ベクトル $\vec{\tau}(t_x, t_y, t_z)$ を求める.

$$\vec{h} \cdot \vec{\tau} = h_x t_x + h_y t_y + h_z t_z = \cos(\theta)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{\tau} = n_x t_x + n_y t_y + n_z t_z = 0$$

$$t_x^2 + t_y^2 + t_z^2 = 1$$

ただし $\sigma_3 \cdot \vec{\tau} > 0$ のものを選ぶ. $\sigma_3 \cdot \vec{\tau} = 0$ の場合は $\sigma_1 \cdot \vec{\tau} < 0$ のものを選ぶ. さらに, この σ_1 - σ_2 - σ_3 -座標系で求めた $\vec{\tau}$ がもとの座標系 (x -, y -, z -座標系) における下盤の動きと反対方向の場合, すなわち $n < 0$ の場合, $n = 0$ で, $l < 0$ の場合および $m = -1$ の場合は, $-\vec{\tau}(-t_x, -t_y, -t_z)$ が解となる.

p) 最大剪断応力の単位ベクトル $\vec{\tau}$ と断裂面の走向方向の単位ベクトル \vec{H} のなす角度 α を求める.

$$\vec{H} \cdot \vec{\tau} = H_x t_x + H_y t_y = \cos(\pm \alpha)$$

$$\pm \alpha = \cos^{-1}(H_x t_x + H_y t_y)$$

$\vec{H} = \vec{\tau}$ の場合, $\alpha = 0$, $\vec{H} = -\vec{\tau}$ の場合, $\alpha = 180^\circ$

ただし, $t_z > 0$ の場合 $\alpha > 0$,

$t_z < 0$ の場合 $\alpha < 0$,

$t_z = 0$ の場合, $t_y < 0$ なら $\alpha < 0$

$t_y > 0$ なら $\alpha > 0$

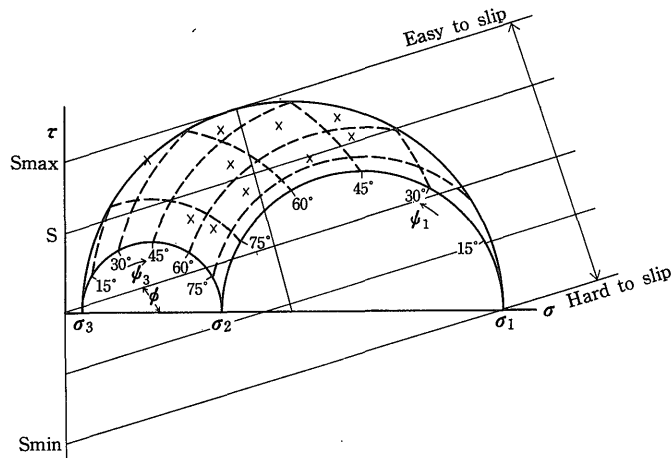
3. いくつかの断裂面上の条線方向から, それらの条線を生じさせた主応力軸方向およびR値を求める方法

3.1 測定値

いくつかの断裂面の方向およびその各々の断裂面上の条線方向が測定されているものとする. これらの測定値は, それぞれ2章と同じ形式で与えられるものとする.

3.2 計算法

主応力軸方向 $\sigma_1(\phi_1, \theta_1)$, $\sigma_2(\phi_2, \theta_2)$, $\sigma_3(\phi_3, \theta_3)$ およびR値を一定の値で少しずつ変化させ, それらすべての主応力軸方向およびR値に対応した各断裂面上の最大剪断応力の方向および各断裂面のすべりやすさの重み付けの値(W)を求める. この各々の最大剪断応力の方向がそれぞれの断裂面上の条線方向となす角度に重み付けの値(W)を乗じた値の二乗の平均値が最小になるような,



$\tau = S + \mu \sigma_n$
 $W(S) = \frac{S_{max} - S_{min}}{S - S_{min}}$
 ψ_3 : Angle between the pole of fracture plane and σ_3 axis.
 ψ_1 : Angle between the pole of fracture plane and σ_1 axis.
 μ : Static coefficient of friction.
 S : Inherent shear strength (cohesion).
 \times : Plots on σ - τ plane of σ_n , τ_{max} values on individual fracture planes.

第4図 断裂面のすべりやすさの重み付けの値(W(S))の計算の仕方

Fig. 4 Definition of the weight function (W(S)), which is a reverse function of the aptitude to slip of fracture planes.

主応力軸の方向およびR値を求める。各断裂面がすべる場合は断裂面に作用する垂直応力(σ_n)と剪断応力(τ)について $\tau = S + \mu \sigma_n$ の関係がある(Jaeger and Cook, 1979)。ここでSは粘着力、 μ は摩擦係数であり、各断裂面の力学的性質によって決まる。ここでは、各断裂面の力学的性質は一樣であると仮定し、各断裂面に働く垂直応力(σ_n)と剪断応力(τ)の値のみを考慮して、断裂面のすべりやすさの重み付けをする。重み付けの値(W)は、第4図のようなモールの円上に各断裂面の垂直応力(σ_n)および最大剪断応力(τ)の値をプロットした場合、断裂面がすべらずに耐えられる為に必要な粘着力の最小値(S)の値をもとに、

$$W(S) = \frac{S_{max} - S_{min}}{S - S_{min}} \text{ により求める。}$$

ここでSmaxおよびSminはそれぞれ与えられた応力場においてすべての面を対象に、すべらずに耐えられる為に必要な粘着力の最大値および最小値である。W(S)は $1 \leq$ および ∞ の値であり、ある程度以上の値だと、実際はその断裂面はすべらずに別の方向の断裂面がすべるか新しい断裂面が生じる。

a) ϕ_1, θ_1 および σ_1 に直交する平面内で北方向きの水平線

($\vec{H}\sigma$)と σ_3 のなす角度(ψ_3)を $0 \leq$ および $< 180^\circ$ の範囲で変化させる。R値については $0 \leq R \leq 1$ の範囲で変化させる。各々の ϕ_1, θ_1 および ψ_3 に対して $\sigma_1(\phi_1, \theta_1), \sigma_2(\phi_2, \theta_2)$ および $\sigma_3(\phi_3, \theta_3)$ の方向の単位ベクトルを計算する。ただし $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ は右手系とする。また、 ψ_3 はRakeと同様 σ_3 が水平の場合をゼロとし、下方を正とする。

$$\vec{H}\sigma \cdot \vec{\sigma}_3 = \cos(\psi_3)$$

$$\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_3 = 0$$

$$x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 = 1$$

ただし、 $z_3 \geq 0$ のものを選ぶ。

- b) それぞれの主応力軸の方向およびR値に対して2章で行った方法により、与えられた各断裂面上での最大剪断応力の方向の単位ベクトル(\vec{t})を計算する。
- c) 各々の断裂面上で条線方向の単位ベクトル(\vec{s})と最大剪断応力の方向の単位ベクトル(\vec{t})のなす角度($\Delta\theta$)を計算する。
- d) 各々の断裂面のすべりやすさの重み付けの値Wを求める。いま、最大主応力(σ_1)と最小主応力(σ_3)の値を変化させても、重み付けの値W(S)は変化しないので $\sigma_1 = 1, \sigma_3 = 0$ とおく、

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad \text{したがって } \sigma_2 = 1 - R \text{ である.}$$

また,

$$\begin{aligned} \sigma_n &= l^2 \sigma_1 + m^2 \sigma_2 + n^2 \sigma_3 \\ &= l^2 + m^2 (1 - R) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{\max}^2 &= l^2 \sigma_1^2 + m^2 \sigma_2^2 + n^2 \sigma_3^2 - \sigma_n^2 \\ &= l^2 + m^2 (1 - R)^2 - \sigma_n^2 \\ &= \sigma_n - \sigma_n^2 - m^2 R (1 - R) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{\max} &= \tau - \mu \sigma_n = \frac{1}{2} \cos \phi - \tan \phi \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \phi \right) \\ &= \frac{1}{2} (\sqrt{1 + \mu^2} - \mu) \end{aligned}$$

$$S_{\min} = -\mu$$

$$S = T_{\max} - \mu \sigma_n$$

$$W(S) = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S - S_{\min}} = \frac{\sqrt{1 + \mu^2} - \mu}{2(T_{\max} - \mu \sigma_n + \mu)}$$

- e) それぞれの主応力軸の方向およびR値に対して指定された個数の各断裂面の $\Delta \theta W_i(S)$ を値の小さいものから選び、二乗の和

$$\sum_{i=1}^n (\Delta \theta W_i(S))^2 \quad (n \text{ は指定された断裂面の数})$$

を計算し最小のものを選ぶ。

この最小値を示した場合の主応力軸の方向およびR値が、指定された個数の断裂面に対し条線の方向とその断裂面上の最大剪断応力の方向のなす角度にすべりやすさの係数を乗じた値の二乗の平均を最小にする。

4. 本プログラムの概要

本プログラム (STRS) のメインフローを第5図に示した。与えられた2つのベクトルとそれぞれある角度をなす単位ベクトルを計算する必要がくり返しおこるので、そのプログラムをサブルーチン UNIVVEC として作成した。なお、UNIVVEC においては一般には2つの単位ベクトルが解として求まるが、そのうちの1つをそれぞれの場合に依じて選択するため、選択方法を5つのケース (IFLAG=1-5) に分類してその中から選べるようにした。

本プログラムは Bott (1959) の計算結果および Bott (1959) と主応力軸の方向は同じだが断裂面をいろいろな方向に変えた場合、および Etchecopar *et al.* (1981), Angelier (1979) などの1つの応力場ですべての断裂面上の条線が生じた場合のデータの計算結果と本プログラムによる計算結果がよく一致することから、正しいものとする。

本プログラムは、RIPS の FACOM M780 を用いて開発したが計算時間は計算する角度間隔により、およそ $t = \left(\frac{10}{a} \right)^2 \times 1.8 \times \text{個数}$, で変化する (t は秒, a は角度間

隔)。したがって本プログラムでいくつかの断裂面上の条線から主応力軸の方向およびR値を求める場合、計算時間を節約する為、最初は $5^\circ - 10^\circ$ 毎に計算し大まかな解を求め、さらに求めた解を中心に $\pm 5^\circ - \pm 10^\circ$ の範囲を 1° 毎に計算し正確な解を求めるのがよい。しかし、この場合最初の大まかな計算では最適値付近の解ではなく2番目や3番目の適値付近の解が得られる場合もある。しかし、本プログラムではいろいろな個数の場合について計算しているで、ほとんど確実に最適値付近のものは、かなり広い個数の範囲で繰り返し選ばれてくる。万一、2番目や3番目の適値が選ばれたとしても、以下に記すように、その解として選ばれたものを除いて次の処理を行った場合に最適なものが選ばれる。各個数の解について、最大剪断応力の方向と条線のなす角度 ($\Delta \theta$) のヒストグラムを描かせると、正規分布に近いものが出て来る。そのようなものが正解と考えられる。次に正解として選ばれた断裂面を除いて第2回目の処理を行い、同様の方法で解を求める。これを繰り返すことにより各断裂面上の条線は、複数の異なった応力場により生成したものに分類される。

本プログラムでは、移動のセンスが不明の断裂については逆のセンスも正しいものとして計算できるようにしてある。この場合、 σ_1 と σ_3 がいかかわり、したがってRが $1 - R$ となるような解も正解となるので、注意する必要がある。断裂面のすべりやすさによる重み付けについては、断裂面の摩擦係数 (μ) を与えなければならないが、この値は実際は0.1から1.0ぐらいいまで変化する。しかし第4図から判断すればこの変化による影響はそれほど大きくないものと判断される。なお、本プログラムでは重みを付けずに最大剪断応力と条線の方向のなす角度の二乗和を最小にするような従来の方式も選択できるようにした。

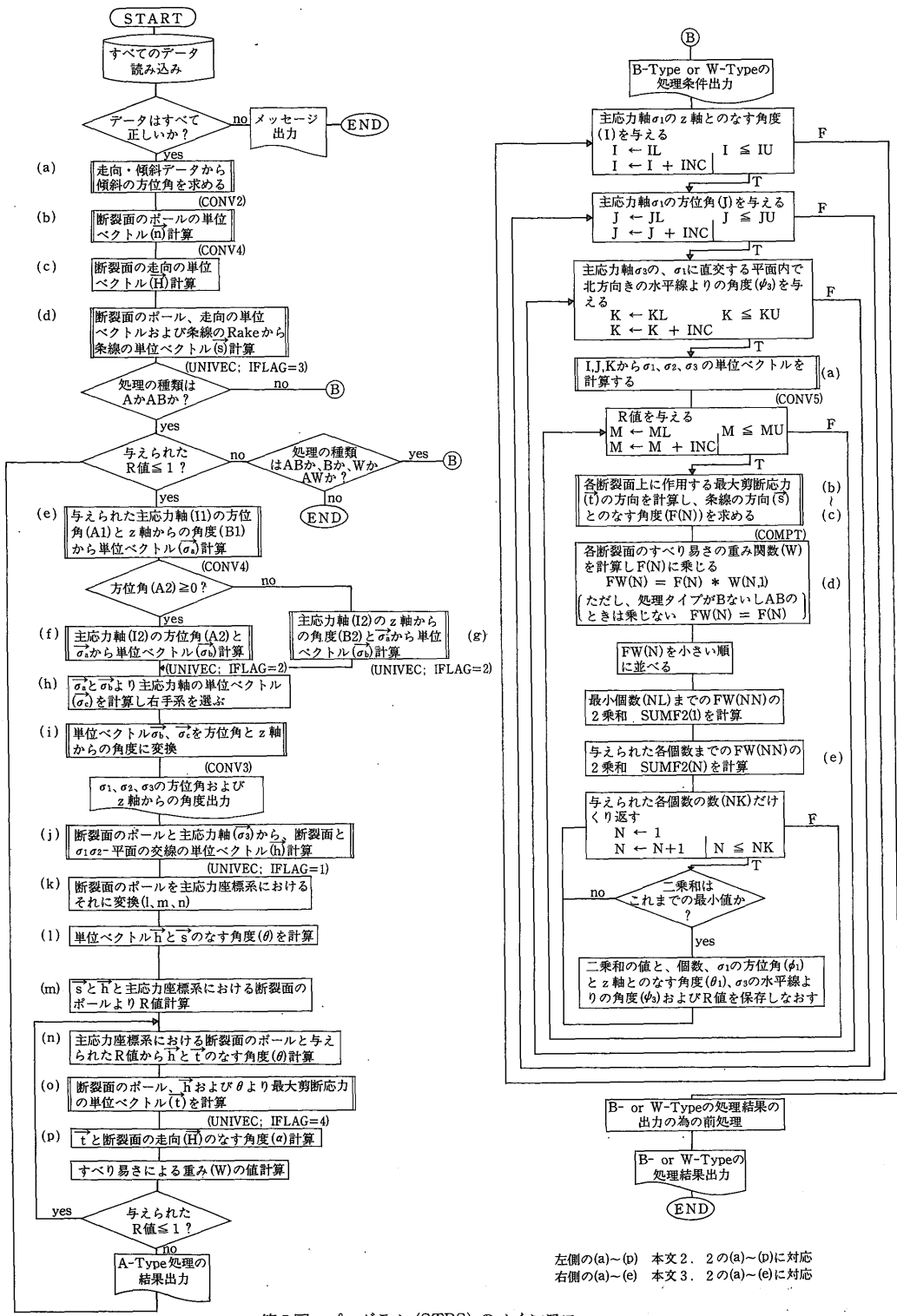
5. 本プログラムの使用例

本プログラムを用いて伊豆南部の断裂面上の条線の解析を行った。測定した断裂面の数は50個だがそのうちの5個は条線の方向が不確実なので、除外して解析した。解析に用いた45個のうち29個の断裂の条線については移動のセンスが不明として取り扱った。残りの16個については、地層面の隔離量をもとに山田 (1980) により、移動センスを決めた。なお、摩擦係数 (μ) の値は0.5を用いた。

5.1 処理手順

a) 45個のデータすべてを用いての処理 (1回目)

5° 毎に処理した結果すべての個数 (13-31) の選択に対し、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ の方向およびR値がかなりせまい範囲に集中



左側の(a)~(d) 本文 2. 2の(a)~(d)に対応
 右側の(a)~(e) 本文 3. 2の(a)~(e)に対応

第 5 図 プログラム (STRS) のメインフロー
 Fig. 5 Main flow chart of the program (STRS).

第2表 伊豆南部の断裂面上の条線データの処理結果
Table 2 Results of the analyses of the striation data on fracture planes, developed in the southern part of the Izu Peninsula.

1st Processing (45 fractures)

Stress type	Selected fractures	σ_1		σ_2		σ_3		R	Representative	Used fractures
		ϕ_1	θ_1	ϕ_2	θ_2	ϕ_3	θ_3			
A	17-19	146-7	61-2	206-7	132-3	258	56	0.88	18	45
A	20-22	148-9	72-3	192-4	155-7	243-4	74-5	0.75-6	21	45
A	23-27	146	65	188-91	147-8	245-6	69-71	0.86-8	24	45

2nd Processing (27, 24, 21 fractures)

Stress type	Selected fractures	σ_1		σ_2		σ_3		R	Representative	Used fractures
		ϕ_1	θ_1	ϕ_2	θ_2	ϕ_3	θ_3			
B	9-14	96-9	7-8	185-6	90	275-6	82-3	0.53-7	12	27(=45-18)
C	15-16	105	11	152	98	240	82	0.44	16	27(=45-18)
B	9-12	104	8	188	91	278	82	0.53	11	24(=45-21)
B	13	98	8	186	90	276	82	0.55	13	24(=45-21)
B or C	14	358	6	176	84	266	90	0.41	14	24(=45-21)
B	8-12	91-3	6	183-5	90	273-5	84	0.52-4	11	21(=45-24)

3rd Processing (15, 11, 13, 10 fractures)

Stress type	Selected fractures	σ_1		σ_2		σ_3		R	Representative	Used fractures
		ϕ_1	θ_1	ϕ_2	θ_2	ϕ_3	θ_3			
C	6	100	15	135	102	223	82	0.29	6	15(=45-18-12)
A'	7-8	149	74	256	44	45	50	1.00	8	15(=45-18-12)
A''	6	150	75	243	80	4	18	1.00	6	11(=45-18-16)
C	6-7	69	9	141	93	231	81	0.33	7	13(=45-21-11)
C	5-8	0-95	10-20	135-42	75-100	229-31	77-81	0.21-0.35	8	10(=45-24-11)

したので、つぎの1°毎の処理はその範囲で行った。その結果すべての個数(15-24)の選択に対し、 σ_1 の方向は146°-149°の範囲でほぼ一定であり傾斜は約10°程度の差を示した(第2表)。そこで代表として、18個、21個、24個の断裂面の場合を選び、それぞれの個数において選択された断裂を除いた残りの断裂のみを用いて2回目の処理を行った。

b) 1回目の残りの27個、24個、および21個のデータを用いての処理(2回目)

27個の場合は、5°毎の処理をした結果、すべて σ_1 の傾斜は垂直に近く($\theta=5^\circ-10^\circ$)その方向は30°-105°の範囲で変化がある。そこで範囲をしばって2°毎の処理を行いさらに1°毎の処理を行った。その結果9-14個を選択した場合は、 σ_2 の方向が185°-186°でR値が0.53-0.57であるのに15-16個を選択した場合は、それぞれ152°および0.44であった。なお、17-18個を選択した場合は、最大剪断

応力の方向と条線の方向のなす角度のヒストグラムが正規分布から逸脱しており、標準偏差値もかなり大きく、上記の2つの場合の中間的な値となっている。そこで、12個と16個の断裂面の場合を代表として選び、それぞれの個数において選択された断裂を除いた残りの断裂のみを用いて3回目の処理を行うことにした。

24個の場合は、5°毎の処理では σ_1 がすべて垂直に近いが($\theta=5^\circ$)、方向に大きな違いがあるので、範囲をしばって、2°毎の処理を行った。その結果9個から12個を選択した場合一定の値となった。また、13個を選択した場合はほぼ近い値となった。14個を選択した場合はやや異なった値となり、標準偏差値が急に大きな値となった。そこで、11個の場合を代表として選びその場合に選択された断裂を除いた残りの断裂のみを用いてやはり3回目の処理を行うことにした。

21個の場合は、5°毎の処理では σ_1 がすべて垂直に近い

第3表 各応力条件における断层面上の条線と最大剪断応力の方向のなす角度の一欄表
 Table 3 List of angles between the directions of striations and of the maximum shear stress on each fracture plane under various stress conditions. Stress conditions were indicated by the types, R-values and representative numbers shown in Table 2.

Fracture Strike Dip	Plane Dip	Plane Rake	A-Type			B-Type				C-Type		
			88-18	76-21	88-24	53-11	54-12	52-11	55-13	33-7	44-16	29-6
46W 82W	0?		2*	10*	2*	20*	20*	20*	20*	20*	20*	20*
56N 90	-170		20	15	20	7	7	5	9	20	14	20
30W 74E	-14		16	1	2	13	10	15	15	**	20	**
74W 80N	-10		14	2	10	20	20	20	20	6	3	1
41W 80N	-5		6	1	9	5	7	8	5	20	20	**
65W 40N	-60		20	20	20	4	2	1	3	3	3	6
32W 60E	-15		5	10	12	20	20	20	20	20	20	**
15W 58S	-103		20	20	20	0	1	1	1	20	20	20
62W 85N	0+		20	7	19	4	2	3	1	13	3	13
45W 80S	-5?		12*	20*	10*	20*	20*	20*	20*	20*	20*	20*
8E 85S	166		20	10	20	20	20	20	20	4	1	1
5E 88S	160+		20	3	12	20	20	20	20	4	4	1
44W 86S	0+		1*	10*	3*	20*	20*	20*	20*	20*	20*	20*
50W 70N	-10		6	0	7	20	20	20	20	20	20	20
15W 85S	-17+		20	12	14	20*	20*	20*	20*	20	20	17
48W 66N	-20+		4	8	3	20	20	20	20	20	20	20
44W 45N	-15+		0	5	2	20	20	20	20	20	20	20
14W 55S	-25+		4	2	7	20	20	20	20	20	20	20
16W 75N	158		20	5	8	**	**	**	**	20	20	20
68W 54N	0+		6	1	4	20	20	20	20	20	20	20
55W 76N	-45?		20	20	20	20	20	20	20	20	20	0
39W 82N	105		**	**	**	**	**	**	**	20	**	20
53W 80N	0?		18	7	17	20	20	20	12	10	15	20
66W 73S	-39+		8	20	14	20	20	20	20	20	20	20
56E 75S	25+		20	20	20	4*	0*	1*	2*	20*	20*	20*
89W 62N	-30		20	20	20	20	20	20	20	0	8	2
50E 72S	-152+		20*	20*	20*	2	4	5	3	20	2	20*
69W 71N	-44		20	20	20	3	1	0	1	17	13	10
65W 71N	-41		20	20	20	0	1	1	0	10	8	2
70E 70N	-160		20	20	0	20	20	**	20	2	20	0
37W 66N	-43+		20	20	20	2	1	1	0	20	20	20
47W 88S	-15+		5*	10*	5*	20*	20*	20*	20*	20*	20*	20*
79E 72N	-2+		20*	0*	20*	20	20	20	20	20	20	20*
83E 68N	-160		2	20	11	20	20	20	20	1	20	2
15W 90	180		**	**	**	20	20	20	20	**	**	**
66E 38N	-65+		0	4	1	20	20	20	20	20	20	20
35W 75N	-10+		2	0	5	14	20	20	15	20*	20	20*
31E 24N	-84+		20*	20*	20*	0	0	1	2	20	0	20
39W 64S	-20+		20	20	20	20*	20*	20*	20*	20	20	20
6W 52W	-65+		20	20	20	20	20	20	20	1	5	11
80W 78S	40+		20*	20*	20*	20*	20*	20*	20*	2*	5*	1*
70W 68S	-10+		10*	6*	10*	20	20*	20*	20*	20*	20*	20*
74W 84N	-30		3	20	8	1	9	8	8	20	20	20
42W 62N	-25		8	7	6	20	20	20	20	20	20	20
86W 90	-150		20	20	20	**	**	**	**	15	20	18
80W 90	-165+		20	20	20	20	3	0	2	2	6	0
55W 50W	80+		20*	20*	3*	1*	4*	7*	1*	1*	1*	8*
68W 70S	0?		20*	13*	20*	20*	20*	20*	20*	20*	20*	20*
0 76W	-30+		2	10	5	20	20	20	20	13	20	8
5E 81W	-30+		5	10	2	20	20	20	20	4	15	2

** denotes angles more than 9°.

+ denotes rakes for which the sense of slip is undetermined.

? denotes rakes, which are ambiguous.

* denotes angles, which were calculated by reversing the sense of slip.

20 Those of which the value $(\Delta\theta * W(S))$, i.e., the angle between the directions of striations and of the maximum shear stress $(\Delta\theta)$ multiplied by the weight $(W(S))$, is 20 or more.

が($\theta_1=5^\circ$)、方向に大きな違いがあるので、範囲をしばって、 2° 毎の処理を行った。その結果8個から12個を選択した場合すべて方向は 2° の差およびR値は0.02以内の差の範囲になったので、11個の断层面の場合を代表として選び、その場合に選択された断層を除いた残りの断層のみを用いてやはり3回目の処理を行うこととした。なお、13個の場合もほぼ近似しているが、14個および15個の場合は最大剪断応力の方向と条線の方向のなす角度のヒストグラムが正規分布から逸脱しており、標準偏差値も急に大きな値となった。

c) 2回目の残り15個、11個、13個、および10個のデータを用いての処理(3回目)

15個の場合は、 5° 毎の処理を行った結果6-7個を選択した場合と8個を選択した場合で全く異なった結果となったので、それぞれの範囲で 2° 毎の処理を行った。その結果を標準偏差値で比較し低い方のものを採用すると6個の場合と7-8個の場合でやはり全く異なった結果であった(第2表)。

11個の場合は、 5° 毎の処理を行った結果5-6個の場合かなり似た値となったが、それ以上だとヒストグラムが正規分布から逸脱し標準偏差値も著しく大きくなる。

13個の場合も 5° 毎の処理を行った結果5-7個を選択した場合はかなり近い値を示したが、それ以上だとヒストグラムが正規分布から逸脱し標準偏差値も著しく大きくなる。そこで5-7で示された範囲にしばって 2° 毎の処理を行った結果やはり6個と7個の場合一定の値となった。

10個の場合は、 5° 毎の処理を行った結果、5-7個を選択した場合やや近い値を示したので範囲をしばって 2° 毎の処理を行った。その結果5-8個の場合かなり近い値を示したが、かなりの値の差が認められた(第2表)。

5.2 処理結果のまとめと考察

1回目から3回目までの処理結果として抽出された最適な主応力軸の方向およびR値は第2表に示したようにA、BおよびCの3つのタイプに区分出来る。このほかに3回目の処理でA'やA''タイプが抽出されたがこれらのタイプは第1回目の処理で18個の断層を取り除いた場合に3回目の処理で出てきており、それらのタイプの断層の多くは1回目の処理で21個ないし24個の断层面として選ばれたものと一致しておりAタイプに含めることが出来る。また、BタイプとCタイプの中間タイプが第2回目の処理で抽出されることがあるが、この中間タイプは標準偏差値が急に大きな値となり、ヒストグラムが正規分布からはずれることが多く、本来BタイプとCタイプに区別されるべきものが融合されたものと考えられる。そこで、このように抽出されたAタイプ3つ、Bタイプ4

つおよびCタイプ3つの応力条件における各断層面上の最大剪断応力の方向と条線の方向のなす角度をRakeの値が窺わしいもの5個を含めて50個の断層について計算し一覧表として第3表に示した。

Aタイプの応力場は第1回目の処理ではこのタイプしか現れず、しかも5割から6割の断層はこのタイプの応力条件で説明できる。Aタイプのなかでも18個の断層を抽出したものは、21個および24個の断層を抽出したものにすべて含まれるので、この21個および24個を抽出した応力条件すなわち、 $\sigma_1(148,73)$ 、 $\sigma_2(192,157)$ 、 $\sigma_3(243,75)$ 、 $R=0.76$ 、および $\sigma_1(146,65)$ 、 $\sigma_2(190,147)$ 、 $\sigma_3(246,70)$ 、 $R=0.88$ がこの地域の主要な応力条件の1つであったと考えられる。

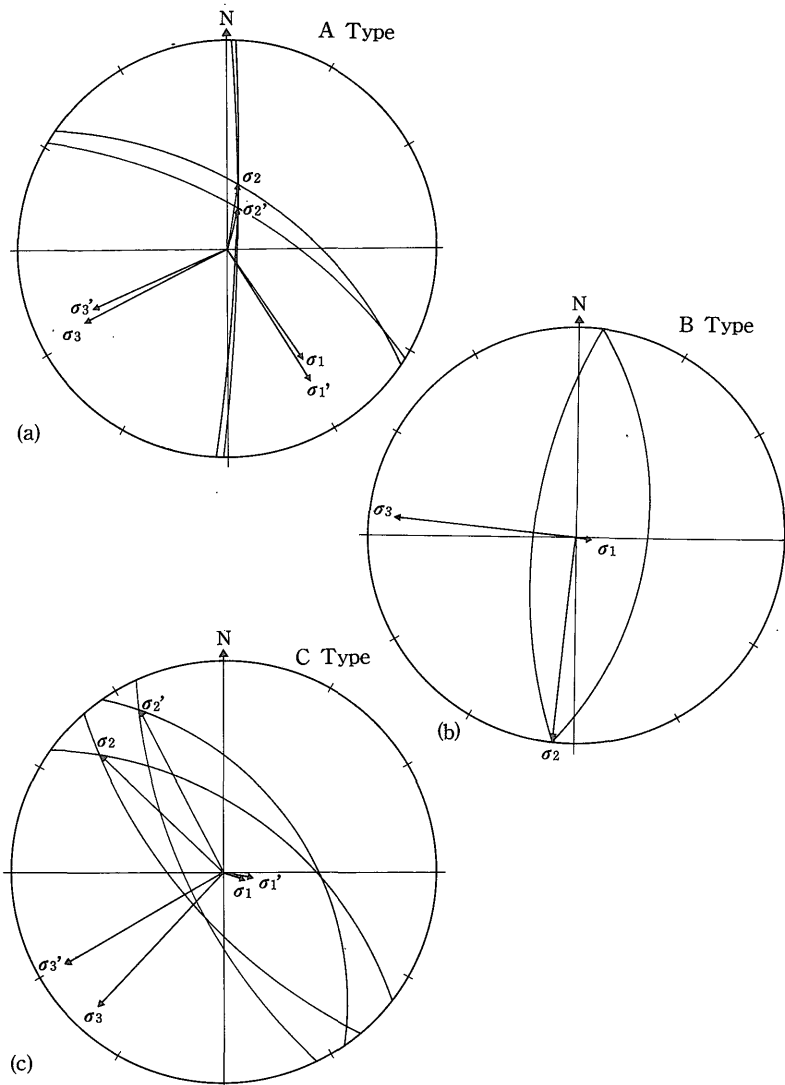
Bタイプの応力条件は第2回目の処理で現れる主要なもので、このうち $\sigma_1(98,8)$ 、 $\sigma_2(186,90)$ 、 $\sigma_3(276,82)$ 、 $R=0.55$ の応力条件では他のBタイプの応力条件で選択される断層すべてを含んでいる。この応力条件では約3割5分の断層が説明できる。

Cタイプの応力条件は第2回目の処理および第3回目の処理で現れる。このうち3回目でも7個を抽出した応力条件で選ばれる断層はCタイプの他の2つの応力条件の場合に選ばれる断層にすべて含まれる。このCタイプの応力場、すなわち、 $\sigma_1(105,11)$ 、 $\sigma_2(152,98)$ 、 $\sigma_3(240,82)$ 、 $R=0.44$ 、および $\sigma_1(100,15)$ 、 $\sigma_2(135,102)$ 、 $\sigma_3(223,82)$ 、 $R=0.29$ によっておよそ4割から4割5分の断層が説明できる。

これらA、B、Cタイプの応力場の主応力軸の方向およびそのような主応力軸配置により剪断面角が 60° の共役断層が生じた場合の共役断層面をウルフネット上に示した(第6図)。

なお、これらの3つのどのタイプの応力条件によってもあまりよく説明出来ない断層が3つある。また、Bタイプの応力条件でないとあまりよく説明出来ないものが3つ、Cタイプの応力条件でないとあまりよく説明出来ないものが5つある。

さて、このAタイプの応力条件は、本地域に現在も働いていると考えられている応力場(Nakamura *et al.*, 1984)と主応力軸の方向がかなり良く一致しており、そのような応力場を反映したのと考えられる。Bタイプの応力条件については、0.5Maより以前に伊豆半島の北では神縄逆断層をもたらしたような南北方向の圧縮応力、また、同時に東伊豆上昇帯をもたらしたような東西方向の曲げ応力に伴う東西方向の伸長応力場が推定されており(Ito *et al.*, 1989)、そのような応力場との関連が考えられる。なお、(Nakamura *et al.*, 1984)は同様の応力



第6図 伊豆半島南部の応力場の解析結果(ウルフネット下半球投影)

Fig. 6 Results of an analysis of stress fields of the southern part of the Izu Peninsula, plotted on the lower hemisphere of the Wulff net.

- (a) A-タイプの主応力軸の方向および剪断面角を 60° とした場合の共役断层面。
 (a) A-type principal stress directions and conjugate fault planes, which will form by the stress if a dihedral angle of 60° is assumed.
 σ_1 (146, 65), σ_2 (10, 33), σ_3 (246, 70) $R=0.88$ σ_1' (148, 73), σ_2' (12, 23), σ_3' (243, 75) $R=0.76$
- (b) B-タイプの主応力軸の方向および剪断面角を 60° とした場合の共役断层面。
 (b) B-type principal stress directions and conjugate fault planes, which will form by the stress if a dihedral angle of 60° is assumed.
 σ_1 (98, 8), σ_2 (186, 90), σ_3 (276, 82) $R=0.55$
- (c) C-タイプの主応力軸の方向および剪断面角を 60° とした場合の共役断层面。
 (c) C-type principal stress directions and conjugate fault planes, which will form by the stress if a dihedral angle of 60° is assumed.
 σ_1 (105, 11), σ_2 (332, 82), σ_3 (240, 82) $R=0.44$ σ_1' (100, 15), σ_2' (315, 78), σ_3' (223, 82) $R=0.29$

場の変化は1.0Ma頃におこったと推定している。Cタイプの応力条件は、本地域に広く認められるNW-SE方向の共役正断層群を生じさせた応力場に一致している。なお、伊豆南部の断裂系については、現在別に詳しい報告を準備中である。

6. 結 論

従来の解析法のように断层面のすべりやすさによる重み付けを行わないで最大剪断応力の方向のみを考慮して最適な応力場を解析すると、最大圧縮応力 σ_1 が断层面に直交に近く、したがって断层面上に作用する剪断応力の値が著しく小さく断层面は非常にすべりにくくとも、剪断応力の方向が条線の方向に近ければ、そのような応力場が最適なものとして選ばれる。すべりやすさによる重み付けをすれば、すべりにくい断裂が少なくなるが、剪断応力の方向と条線の方向のなす角度の和はやや大きくなる。

断面上の条線が複数の異なった応力場によって生じた伊豆南部の解析例では、重み付けを行った場合は、ほぼ満足できる解が得られたが、重み付けを行わない場合には断裂の個数により解が異なり、人為的に解を選択しないと満足のいく解が得られなかった。

謝辞 本プログラムの開発および計算には工業技術院情報センターの研究情報管理システム(RIPS)のFACOM M780を用いた。

文 献

- Angelier, J. (1979) Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, vol. 56, p. T17-T26.
- , Tarantola, A., Valette, B. and Manoussis, S. (1982) Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress. I. Single phase fault populations: a new method of computing the stress tensor. *Geophys. J. R., astr. Soc.*, vol. 69, p. 607-621.
- (1989) From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *J. Structural Geology*, vol. 11, p. 37-50.
- Bott, M. H. (1959) The mechanics of oblique slip faulting. *Geol. Mag.*, vol. 96, p. 109-117.
- Etchecopar, A., Vasseur, G. and Daignieres, M. (1981) An inverse problem in micro-tectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *J. Structural Geology*, vol. 3, p. 51-65.
- Ito, T., Kano, K., Uesugi, Y., Kosaka, K. and Chiba, T. (1989) Tectonic evolution along the northernmost border of the Philippine Sea plate since about 1Ma. In: J. P. Cadet and S. Uyeda (Editors), *Subduction Zones: the Kaiko Project*. Tectonophysics, vol. 160, p. 305-326.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W. (1979) Fundamentals of rock mechanics. 3rd Edition, Chapman and Hall, London. 593p.
- Nakamura, K., Shimazaki, K. and Yonekura, N. (1984) Subduction, bending and education. Present and Quaternary tectonics of the northern border of the Philippine Sea plate. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 26, p. 221-243.
- 山田 啓三 (1980) 断層の移動量及び隔離量を求める電算機プログラム. 地調月報, vol. 31, p. 567-584.

(受付: 1991年4月16日; 受理: 1991年7月20日)