

多重逆解法：複数の応力を検出する小断層解析の新技术

Multiple inverse method : a numerical technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data

山路 敦*

Atsushi Yamaji*

Abstract: The multiple inverse method was recently proposed by the author to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. The principle of the method is to calculate optimal stresses for all combinations of k data sets where k is any integer smaller than the number of whole data. The optimal stresses are characterized by four parameters—one for the shape of stress ellipsoid and three for the orientation of the principal axes. The solutions make clusters in the four-dimensional parameter space around the correct stresses, so that software to visualize the clusters is also developed. The purpose of this paper is to explain the theoretical background and usage of the technique.

Key words: *fault inversion, stress field, multiple inverse method, fault-slip data*

はじめに

小断層解析法は急速に進歩している。過去30年以上にわたって我が国では共役断層法が広く用いられてきたが、それによって妥当な解を出せるのは、特殊な場合にすぎないことがわかってきた。一つのテクトニック時階に活動する小断層群がすべて共役ならば、それらを含む岩体は、中間主応力軸に垂直な平面歪みしかおこさないはずである。しかし歪みは一般に三次元的であるはずだから、普通は共役でない断層がたくさん活動するだろう。ゆえに共役断層法は、一般には間違った答えを出してしまうというわけである。

三次元的歪みを許容する小断層解析として、海外ではすでに1980年前後から Angelier (1979, 1984) や Marrett and Allmendinger (1990) の解法が広く用いられている。それらが露頭観察において共役断層法と違う点は、断層擦痕の観察が不可欠なことである。擦痕を丹念に見てみると、露頭面において正断層あるいは逆断層に見えるものも、斜めずれ断層であったり、極端な場合、横ずれ断層であることがわかる。露頭面上の見かけと真の変位センスが一致しないのは決して例外的ではなく普通に経験することである (三野・山路, 1999)。また、横ずれ断層では地層の傾斜方

向とのかねあいで、露頭面上では正断層に見えたり逆断層に見えたりする。擦痕から真の変位センスを判定しない限り、応力場を推定することはできない。

正断層や逆断層といった露頭面における見かけの変位センスのみならず、真の変位ベクトルを、対象とする全断層でデータとして採取する。したがって、そうして得られるデータを、断層スリップデータ (fault-slip data) とよぶ。

観察した断層群が、単一の応力状態のもとに動いたのなら、Angelier (1984) や Marrett and Allmendinger (1990) の方法で、正しい応力を相応の精度で求めることができるだろう。ところが断層群のうち、ある部分集合が A という応力で動き、別の部分集合が応力 B で動き、そしてまた、という様に複数の応力状態を断層スリップデータが記録している場合は、正しい応力をそれらの方法で分離することは難しい (三野・山路, 1999)。そうしたデータを不均一な (heterogeneous) 断層スリップデータという。

そもそも小断層解析で応力を推定しようとする地域なら、現在とは違った古応力が分かることを期待しているわけで、単一の応力で動いたことをはじめから期待できることは少ない。今と同じ応力が、問題としている過去のある時期にも働いていたならば、in-situ 応力測定でそれが把握できる。不均一なデータから応力を分離するという問題は、小断層解析の方法論にとって根本的問題である。

そのひとつの方法として開発されたのが、多重逆解

1999年3月31日受付。1999年9月1日受理。

* 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

法 (multiple inverse method) である (Yamaji, 1999). 小論の目的は, 多重逆解法を紹介することにある. 多重逆解法は, Angelier (1984) の逆解法が基礎になっている. そこでまず Angelier の方法を説明する.

従来の逆解法

逆解法では, Wallace (1951) や Bott (1959) にならって作用する剪断応力の方向に断層変位がおこると考える. そして断層スリップデータを制約条件として, データセットにとって最適な応力をインバース問題として解くのである. そこで, 小断層解析の逆解法とよぶことにする. 断層が N 条あるとして, 第 i 番の断層面の方向を, 単位法線ベクトル $\mathbf{n}^{(i)}$ で表すことにする. 応力 $\boldsymbol{\sigma}$ によってこの面に作用する応力ベクトルを $\mathbf{t}^{(i)}$ とすると,

$$\mathbf{t}^{(i)} = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}^{(i)},$$

剪断応力 $s^{(i)}$ はその接線成分だから,

$$\begin{aligned} \mathbf{s}^{(i)} &= \mathbf{t}^{(i)} - [\mathbf{t}^{(i)} \cdot \mathbf{n}^{(i)}] \mathbf{n}^{(i)} \\ &= \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}^{(i)} - [\mathbf{n}^{(i)} \cdot \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}^{(i)}] \mathbf{n}^{(i)}. \end{aligned} \quad (1)$$

つまり面の向きが単位法線ベクトル $\mathbf{n}^{(i)}$ で表される断層が, 応力 $\boldsymbol{\sigma}$ が作用することによってすべる方向を $\mathbf{s}^{(i)}$ であるとして,

$$\mathbf{s}^{(i)} = f(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{n}^{(i)}) \quad (2)$$

という関数関係が具体的な形 (式 2) に書けるわけだ.

応力 $\boldsymbol{\sigma}$ が未知なので, これを適当に仮定すると, 第 i 番の断層の動くべき方向がこの式で計算できる. 他方, 露頭観察からは, 断層面の走向傾斜からその断層の \mathbf{n} が計測できるし, 擦痕と変位のセンスからは真の変位ベクトルがわかる. 仮定した $\boldsymbol{\sigma}$ と計測した \mathbf{n} とを式 (1) に代入してすべるべき方向を計算し, 観察した真の変位ベクトルとのずれの角度 $d^{(i)}$, すなわち残差が各断層について求まる. そして残差の絶対値に関する増加関数 $g(d)$ を考えて, 残差の総和

$$S = \sum_i^N g(d^{(i)})$$

を最小にするというスキームにより, 観察した N 条の断層スリップデータに最も適合する応力 $\boldsymbol{\sigma}$ を決定できるわけである. これをデータセットにとって最適な応力とよぶ.

関数 g の形は任意だが, 筆者の解析ソフトでは余弦関数を含んだ次の形

$$g(d) = \frac{1}{2} (1 - \cos d) \quad (3)$$

を使っている. ちなみに Angelier (1979) では

$$g(d) = \begin{cases} \tan d & (|d| < 45^\circ) \\ 1 & (|d| \geq 45^\circ) \end{cases}$$

を使っている. というのも Angelier の方法は, 単一の応力ですべての断層が動いたと仮定しているからで

ある. その仮定が成り立たない断層は例外的であるとして, その場合 d が大きな値をとるであろうから, その影響を抑えるために, d が 45° より大きければ d によらず一定 $g(d) = 1$ にしたわけである (第 1 図). ところが多重逆解法では複数の応力が作用することを前提にしているから場合分けなどせず, $|d|$ に対する単調増加関数を使っている. 式 (3) の形を選ぶ理由は 2 つある. 第 1 の理由は, 上述の単調増加条件である. 第 2 の理由は, 測定誤差の影響を抑制し, 解を安定させるためである. 小断層の面と擦痕の方向を測定するとき, 10° 程度の測定誤差を含むことがある. 誤差がなければ $d = 0^\circ$ であるはずの断層でも, 実際にはゼロから外れてしまうことがあるだろう. こうした影響を抑圧するために, $d = 0^\circ$ の近傍のグラフの傾きが緩い, 式 (3) の形の関数を選んだわけである.

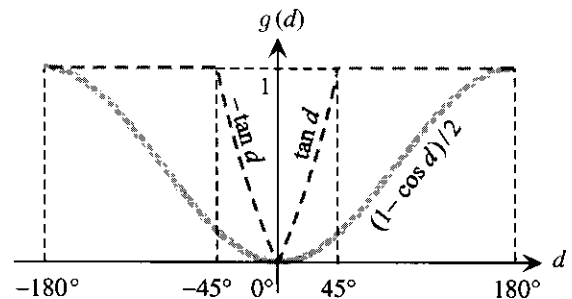
逆解法で決定できるのは応力主軸の方向だけではない. 応力状態を応力楕円体であらわすなら, 楕円体の主軸方向が分かるだけでなく, 軸比も決定できるのである. 軸比を表すパラメータとして, 式

$$\Phi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (4)$$

で定義される応力比 (stress ratio) がよく使われる. これは 0 と 1 のあいだの値をとり, σ_2 が σ_1 に近いのか σ_3 に近いかを表す. $\Phi = 0$ ならば $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ という軸対称の応力, $\Phi = 1$ ならば $\sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3$ という軸対称応力である. また, 応力比がそれらの中間ならば, 三軸応力である. 応力楕円体の形状を示すパラメータとして Angelier らは式 (4) で定義される応力比を使うのだが, その代わりに Yamaji (1999) はロード数 (Lode number)

$$\mu_L = \frac{\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

を使っている. 中間主応力が σ_1 と σ_3 のちょうど中間という「純粹」な三軸応力では $\mu_L = 0$, 軸対称応力なら $\mu_L = \pm 1$ という具合で, ゼロをはさんだ対称性があるために, 応力楕円体の形状が応力比 Φ よりイメージし易いと考えられるからである. もちろん 2 つのパラメータは, 線形の式



第 1 図 残差を評価する関数 $g(d)$.

$$\mu_L = 2\Phi - 1$$

で換算できるから、どちらを用いても本質的な違いは無い。

ロード数 μ_L を -1 から 1 まで変化させると、断層面の方向が同じでも、式(1)によって計算される剪断応力の方向は大きく変化する (Means, 1989)。これはスリップ方向でもある。軸性圧縮応力 ($\mu_L = -1$) なら断層面上で σ_1 軸から最も角距離の隔たった方向にスリップする。軸性伸張応力 ($\mu_L = 1$) であれば、断層面上で σ_3 軸に最も近い方向にスリップする。三軸応力ならその中間である。だから露頭で擦痕の方向を観察することにより、主軸方向のみならず、ロード数や応力比まで推定することができるわけである。

さて、逆解法の解が持つ不確定性について説明しよう。差応力を $\Delta\sigma$ 、単位テンソルを \mathbf{I} とし、応力テンソルを

$$\boldsymbol{\sigma} = \sigma_3 \mathbf{I} + (\Delta\sigma) \boldsymbol{\tau}$$

と書くことにする。ただし $\boldsymbol{\tau}$ は次の形のテンソルである：

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

断層の活動は応力ではなく、有効応力に反応して起こる。そこで間隙水圧を p とすると、有効応力は

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = (\sigma_3 - p) \mathbf{I} + (\Delta\sigma) \boldsymbol{\tau} \quad (5)$$

と書ける。さらに主軸方向を表す回転テンソルを \mathbf{R} とするなら、一般に有効応力は、

$$\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{R}^T \bar{\boldsymbol{\sigma}} \mathbf{R}$$

の形に書ける。ただし添え字 T は行列の転置を表す。これを式(2)に代入すると、すべきき方向は

$$\mathbf{s} = f(\mathbf{R}, \Phi, \sigma_3 - p, \Delta\sigma, \mathbf{n})$$

と書ける。この式は複雑に見えるが、関数 f が実際には $\sigma_3 - p$ と $\Delta\sigma$ には依存しないことが示せる。ここで問題なのは剪断応力の方向であるが、等方テンソルからは剪断応力が生じない。したがって式(5)の右辺第1項は効いてこない。つまり間隙水圧や最小主応力が何であれ、断層が動く方向は変わらない。また、差応力によって剪断応力の絶対値は変化するが、方向は変わらない。したがって小断層の逆解法の解は、 $\sigma_3 - p$ と $\Delta\sigma$ という2つの不確定性を含むことになるわけである。断層活動が起きているような脆性的に臨界状態にある岩体では、差応力は地下深度に比例する (Zoback and Healy, 1984)。したがって差応力が不確定ということは深度が決まらないということである。しかし一般に、露頭観察から断層活動時の深度と間隙水圧を推定することは難しい。ところが幸いなことにそれらがどんな値であれ、式(1)の予言するスリップ方向は不変である。したがって古応力の推定には、そうした不確定性がかえって都合もいえる (三野・山路, 1999)。

決まるのは主応力軸の方向 \mathbf{R} とロード数 μ_L にすぎない。したがって決定されるのは実は応力というより差応力である。このことに関連して、 $\mu_L = 1$ という応力が検出された場合に、用語上の難しさが生ずる。単に axial tension という最大主応力まで負の量のように読めてしまうが、地下の岩石は上載岩圧のため大なり小なり圧縮状態であるわけだから、 $\mu_L = 1$ の場合は axial deviatoric tension といった方が誤解がなからう。 $\mu_L = -1$ なら軸性圧縮応力 (axial compression) といえよ。

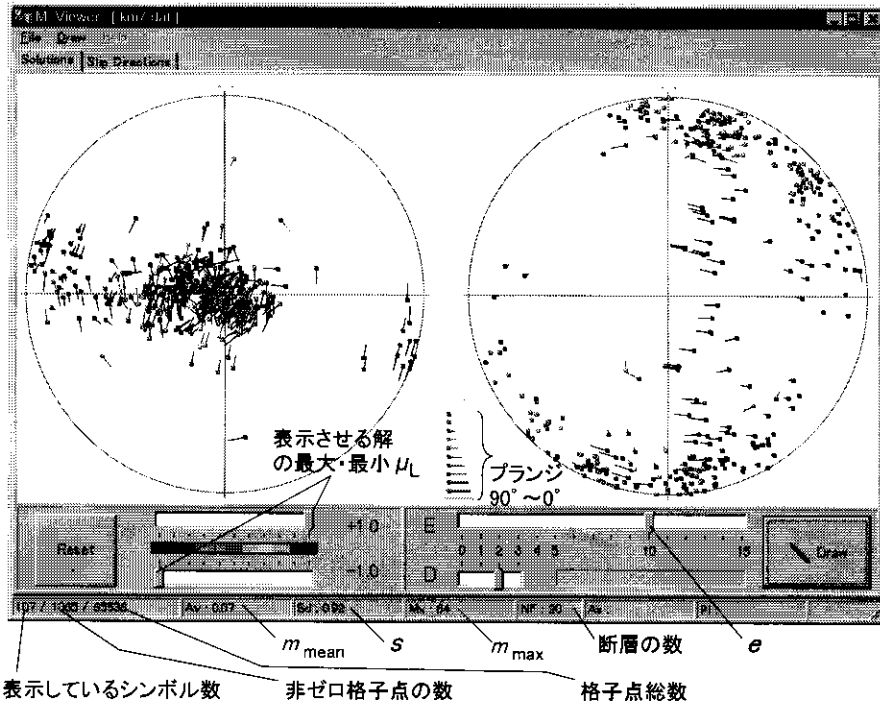
しかしこうした従来の逆解法には弱点がある。対象とする断層が、すべて単一の応力状態で動いたことを前提とする事である。いや、その仮定が事実成り立つ地域であれば、問題なく正しい応力を計算できるだろう。しかしその前提が妥当か否かという判定は難しい。取得した断層スリップデータが単一の応力状態を記録しているか、複数のそれを記録しているか判断するのなら、断層面の走向傾斜が似通ったものに目をつけるとよい。そうした断層が、たがいに逆センスで動いていたたり、擦痕のレイク角が大きく異なっていたら、複数の応力で動いたと判断できるわけである。しかし、あい似た方向の断層が逆センスで動いているというような、明らかな兆候が見られずとも、複数の応力を記録していることもあり得るだろう。ではどうするか。その答えのひとつが多重逆解法 (Yamaji, 1999) である。

多重逆解法

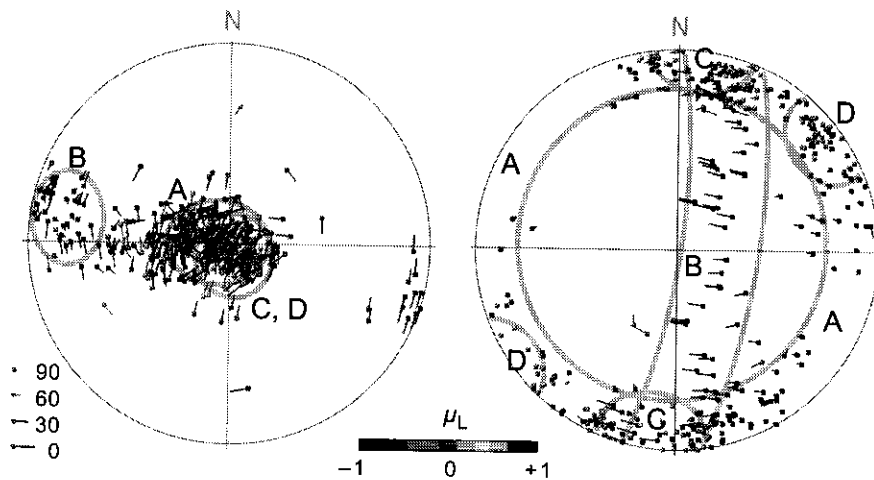
原理

多重逆解法は、記録されている複数の応力状態を不均一な断層スリップデータから検出する数値解法である。観察した小断層群のうち、ある部分集合は応力 A で動いたものであり、他のある部分集合が応力 B で動き、また他の部分集合が応力 C のもとで、という具合に何らかのクライテリアにしたがって、応力に対応するかたちで断層をグループ分けできるなら、各々のグループに対して従来の逆解法を適用し、それぞれ正しい応力を推定することができるだろう。断層の性状、例えばまわりの地層がドラッグされているとか、方解石の slickenfiber lineation を伴うとかいった特徴からクラス分けすることも可能だが、そのような分類が観察した小断層群の全てでできる事など一般には期待できない。どんな応力が作用したかが未知数だし、数値解析に先立つ断層群のグループ分けもできないとする。そこで不均一な断層スリップデータを入力し、数値計算により自動分類と、それらに最適な応力を決定しようというわけである。

断層群を分類するためのア priori な判断基準が無いことが前提であるから、試行錯誤的にそれを試み



第2図 多重逆解法の解を可視化するソフト MI Stress Viewer. 下半球等積投影図が2つ示されている。小さな点に棒が添付されたシンボルが多数プロットされているが、それぞれが一つの解を表す。一つの解は、 σ_1 軸の方向、 σ_3 軸の方向、ロード数という情報になっている。このソフトでは、ロード数が下記の丸棒シンボルのレインボーカラーで区別されている。左側の投影図では、点の位置で σ_1 軸の方向を表し、添付された棒の長さや方向が σ_3 軸の方位角と伏角を表している。棒が長いほど伏角が浅いわけである。右側の投影図では、点と棒の役割が逆になっている。つまり点の位置が σ_3 軸の方向を、棒の方向と長さが σ_1 軸の方位角と伏角をあらわす。こうして、4次元パラメータ空間のクラスターは、この図の上では同じ色で同じ棒の方向と長さをもつシンボルが密集していることによって可視化される。



第3図 識別された4つのクラスター A, B, C, D. 実際にはロード数 μ_L に応じた色が着いている。図の見方は第2図と同じで、下半球シュミットネットにおける丸棒シンボルの位置が、左側の円では σ_1 軸の方向を、右側の円では σ_3 軸の方向を表す。クラスター A および B は軸性圧縮応力なので、左側のシュミットネットではクラスターをなすが、右側ではそれを極とする大円ガードル上に丸棒シンボルが分布する。クラスター C および D は $\mu_L=0$ という三軸応力なので左右どちらの図でも、クラスターをなす。

る。観察した断層が N 条あるとしよう。労力をいとわれないならば、 N 条から任意個数を選んで、それらの小断層部分集合が妥当な解を出せるか否か、検討すればよい。しかし N 個の元をもつ集合から構成できる部分集合の数は、空集合をのぞくと $2^N - 1$ 個であり、 N が例えば 50 だとこれは 16 桁の数となる。計算量が多すぎて処理できない。そこで多重逆解法では、観察した N 条の断層を k 条の断層の組に分ける。ただし後述のように、 k は 4 ないし 5、大きくとも 7 程度の自然数である。何組できるかという、 N 個から k 個との組み合わせだから、二項係数

$${}_N C_k = \frac{N!}{k!(N-k)!}$$

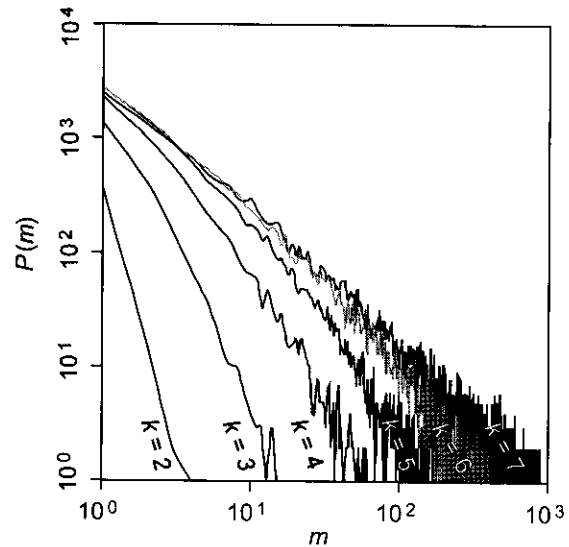
で表される数である。 $N \gg k$ ならこれは大体 N^k のスピードで増大するので、 $2^N - 1$ よりずっと少ない計算量ですむ。たとえば $N=50$ 、 $k=4$ とすると、 ${}_N C_k \approx 23$ 万である。それだけの小断層の組み合わせ全てに逆解法を適用し、それぞれに対して最適な応力を求める。そうして最適解を ${}_N C_k$ 個算出する。

逆解法によって決まるのは、ロード数 μ_L と応力主軸の方向である。主軸の方向は 3 つの角度で規定することができる。たとえば σ_1 平面の走向傾斜と、その面上における σ_1 軸のレイク角といった具合である。筆者が開発した解析ソフトではオイラー角（ゴールドスタイン, 1983）と呼ばれる角 θ , ϕ , ψ を使って主軸方向を記述している。いずれにせよ主軸の方向は 3 つの自由度をもつ。したがって、逆解法ではロード数と併せて 4 つのパラメータが決定できるわけである。つまり断層スリップデータが与えられれば、最適解が得られるわけだが、それは 4 次元パラメータ空間中の 1 点 $(\theta, \phi, \psi, \mu_L)$ として表すことができる。

さて、断層スリップデータが 2 つの応力 A, B を記録しているとすると、A で動かされた断層群から k 個を選んで逆解法を適用したなら、正解の A という応力が得られるだろう。応力 B で動いた断層から k 個とったのなら正解の応力 B が得られるだろう。しかし両方のグループから少しずつとって、あわせて k 個を選んだなら、どちらの正解とも違った答えが出てくるだろう。そこで ${}_N C_k$ 個という非常に多数の解が得られたなら、それらに対応した点を 4 次元パラメータ空間にプロットすると、正解をあらわす点の周りにクラスターが現れるだろう。ゆえにクラスターがその空間のどこに現れるかわかれば、複数の応力を把握できたことになる。これが多重逆解法のコアである。

解の可視化

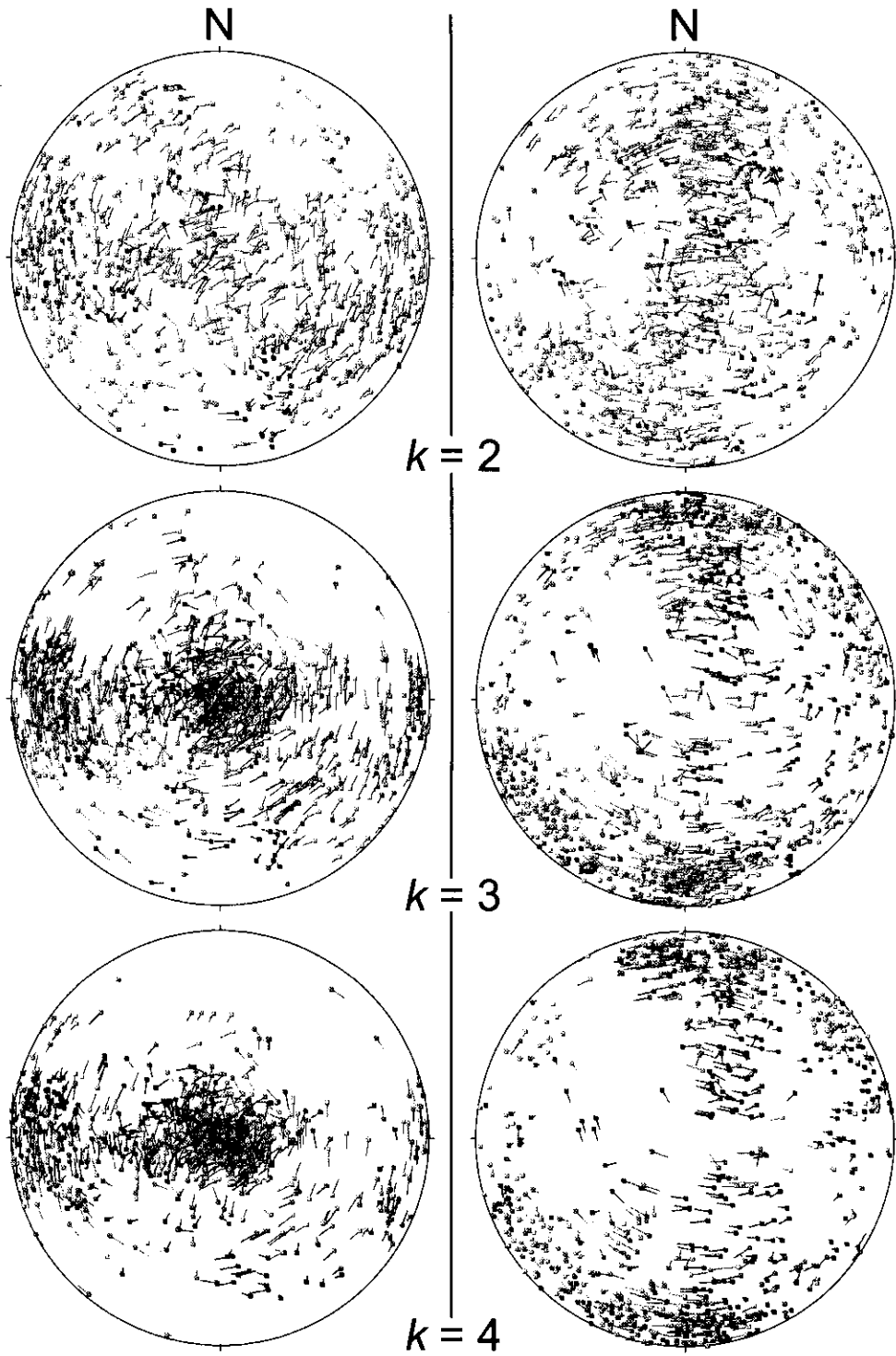
次なる問題は、4 次元空間のクラスターを如何にすれば把握できるかということである。クラスターの把握といえば、クラスター解析用のソフトがすでに普及

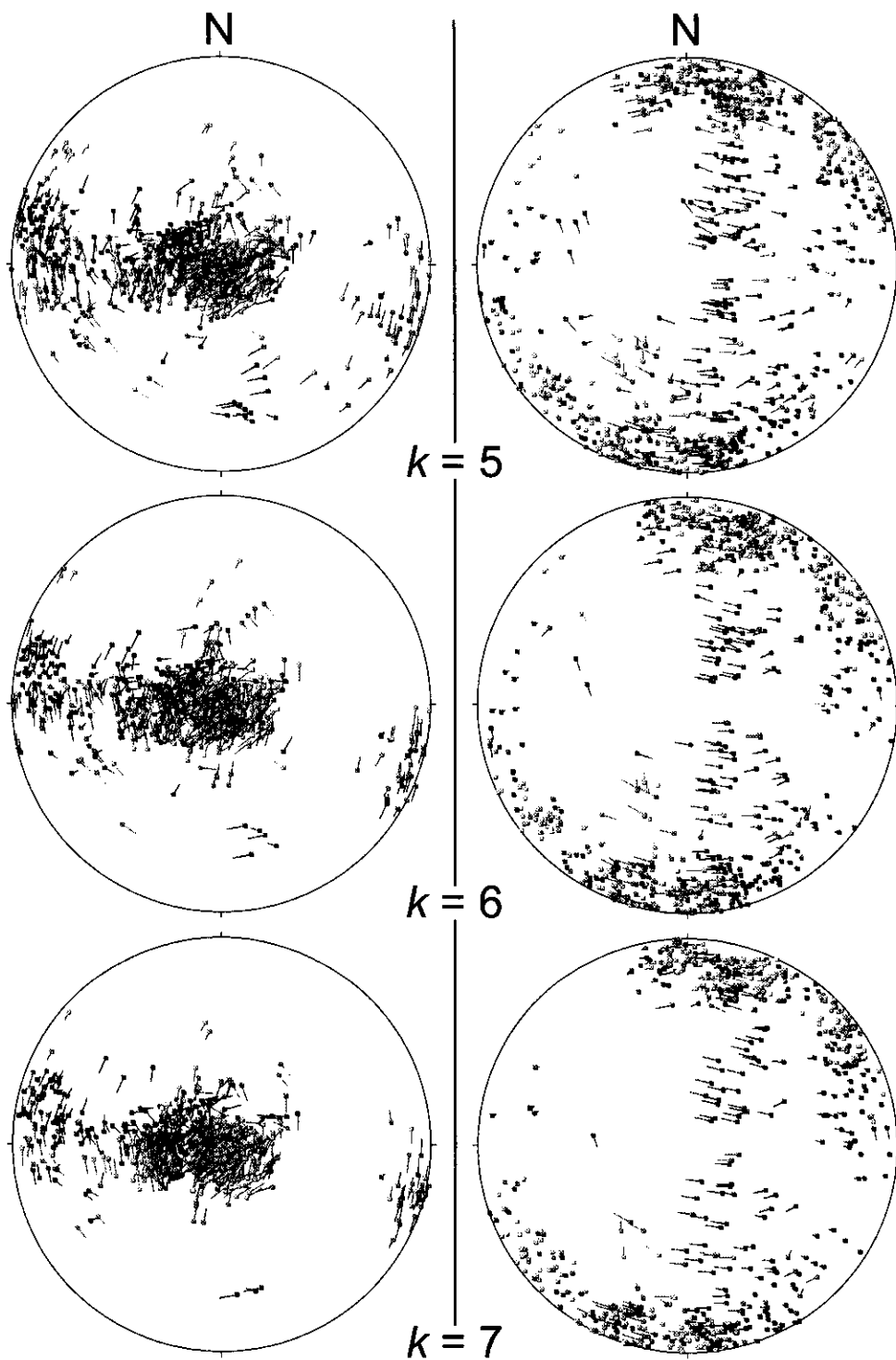


第4図 第3図と同じ天然のデータセットについて、パラメータ空間の密度分布を、 $P(m)$ と m の関係として示す。組み合わせ数 k によらず、両対数グラフではほぼ直線的関係となる。 $k=4$ 以上では、 k が増してもグラフの左のほう (m が小の部分) はほとんど動かず、右のほうがより左にずれてゆく。これはパラメータ空間において、 k の増大とともに解の分布密度が疎な部分は疎のままに、密な部分はより密になっていることを示す。 $k=5$ と 7 の場合と区別するために、 $k=6$ の場合を灰色で示す。

しているが、普通のクラスター解析法はこの場合、2 つの理由で使えない。第 1 の理由は、パラメータ空間が非ユークリッド的だからである。つまり、どんな方向の回転軸でも 物体を 360° 回転すればもとの状態に戻るわけだが、応力テンソルは orthorhombic 対称だから、実際には 180° の回転で戻ることになる。第 2 の理由は、計算量が巨大になってしまうことである。普通のクラスター解析では、2 点間の距離をあらゆるペアについて計算するわけだが、パラメータ空間には ${}_N C_k$ 個の点が分布しており、その数は数十万とか、多い場合には数千個にもなる。それらのペアとなると $({}_N C_k)^2$ 個となり、計算量が多すぎてスーパーコンピュータでも手に負えなくなる。

そこで 4 次元パラメータ空間を 2 次元に投影し、それを図化して目でクラスターを把握するという可視化ソフトを併せて開発した。第 2 図が可視化ソフトの主ウィンドウである。この図には 2 つの下半球等積投影図が示され、そこには小さな丸印に棒が添付されたシンボルが多数プロットされている。その一つ一つが逆解法の解をあらわす。一つの解は、 σ_1 軸の方向、 σ_3 軸の方向、ロード数という情報を保持している。このソフトでは、ロード数が丸棒シンボルの色で区別されている。例えば $\mu_L = -1, 0, 1$ は、それぞれ青、緑、赤で表される。左側の投影図では丸印の位置によって、通常のシュミットネット同様に σ_1 軸の方向を表し、添付された棒ののびる方向と棒の長さが σ_3 軸の方位角





第5図 組み合わせ数 k の増加にともなう解の収束。分散していたシンボルがしだいに集まってゆくことがわかる。プロットの見方は第2図を参照。このデータの場合、 $k=4$ ないし 5 で十分に収束している。すべて $e=3$ でプロットしてある。ロード数の違いは丸棒シンボルの色で区別されている。

(azimuth) と伏角 (plunge) を表している。棒が長いほど伏角が浅いわけである。右側の投影図では、丸印と棒の役割が逆になっている。つまり丸印の位置が σ_3 軸の方向を、棒の方向と長さが σ_1 軸の方位角と伏角をあらわす。4次元パラメータ空間のクラスターは、この図の上では同じ色で同じ棒の方向と長さをもつシンボルが密集していることによって可視化されるわけである。

可視化ソフトは、表示された結果を画像ファイルとして保存することができる。第2図に表示された解析結果を画像として保存し、ドローソフトで注釈などを加筆したのが第3図である。カラーの図版でないという判別しにくい、この例では、4つのクラスターが認定できる。それらは第3図のクラスター A, B, C, D によって表されている。クラスター A および B は青色シンボルからなり、この色は $\mu_1 = -1$ であることを示す。クラスター A が示す σ_1 軸は、ほぼ鉛直である。したがってクラスター A が表すのは鉛直軸性圧縮応力という解である。これは水平方向には等方的なので、第3図の右側のステレオネットでは、シンボルが水平な大円ガードル上に分布している。クラスター B は、やはり軸性圧縮応力だが、 σ_1 軸の方位角が約 280° 、伏角が 10° 弱である。クラスター A にくらべて B は疎である、そのことが解の信頼性の差を表す。A のほうが信頼できる。クラスター C と D は緑色のシンボルの集まりなので、 $\mu_1 = 0$ という三軸応力を表している。主軸の方向は σ_1 軸は C も D もほぼ鉛直、 σ_3 軸はクラスター C のほうの方位角が 10° 、クラスター D のほうの方位角が 53° 、伏角は両方ともほぼ 0° である。

多重逆解法というのは、人工知能でいう一般化 Hough 変換 (松山・和田, 1998) の一応用と考えることもできる。すなわちこの場合、パラメータ空間 ($\theta, \phi, \psi, \mu_1$) を 65536 個の格子点に分割し、最適解が一つ算出されるごとに、その解を表す点が一番近い格子点に 1 票を投ずる。そして得票数 m の多い格子点が、有意な解を表すものと解釈されるわけである。第3図で使った天然の断層データから計算した票数の頻度分布 $P(m)$ を第4図に示す。頻度分布によっては、うまくクラスターを分離できないわけだが、天然のデータおよび数値実験で生成した断層スリップデータから得られた頻度分布は $\log P(m) \propto -\log m$ の形をしていることが示された (Yamaji, 1999)。これはパレート分布といって、高額所得者の頻度分布であり (松原, 1991)、極端に多い得票をした格子点は非常に少なく、大部分の格子点の得票はゼロか非常に少ないことを表す。きれいにクラスターが分離できたわけである。

第2図の画面下部には、 m 値の基本統計量、すなわち平均値・標準偏差・最小値・最大値も表示されている。また得票数がゼロでない格子点の数も示されてい

る。

多重逆解法で $N C_k$ 個の最適解が得られたとして、その全てを可視化すると、シンボルが重複してプロットされてしまい、どこにクラスターがあるか識別できなくなる。そこでデータから算出した上述の m 値の標準偏差 s を使って「解の間引き」ということを行う。具体的には、プロットする解の数を m 個ではなく、 m/es 個にする。ただし e は任意の整数で、強調パラメータとよぶ。商 m/es の小数点以下は切り捨てる。得票数の極端に少ない格子点では、切り捨てられてこの商はゼロとなり、それに対応したシンボルはプロットされない。間引かれるわけである。また得票数の多い格子点は、相対的に強調される。これまで得られた天然のデータや数値実験で生成したデータによると、 $e=1\sim 20$ の範囲にするとクラスターを識別しやすくなる。間引きパラメータ e と m/es も第1図下部に表示されている。

解の収束

多重逆解法では、 N 条の断層スリップデータを k 個ずつの組み合わせに分割し、それらに対して総数 $N C_k$ 回のインバージョンを行う。

さてここで、 k が任意に選べるパラメータであることを強調しておく。データによって最適な値は異なる。この値が小さいと解が不安定になるし、大きいと $N C_k$ 回のインバージョンは膨大な計算時間と計算機メモリーを要する。そこで計算量の許す範囲で k を 2, 3, 4……と変化させ、それぞれに対して同じデータセットに対して多重逆解法を適用し、得られる解が収束する様子を観察する。クラスターのパターンが大局的に変化しなくなれば収束したと見なす。第3図と同じデータセットで解が収束する様子を第5図に示す。 $k=2$ では明瞭なクラスターがみられないが、 $k=3$ でクラスターが出現し、 $k=4$ 以降は大局に変化がなくなる。つまり $k=4$ を過ぎたあたりで解が収束したわけである。収束したパターンと較べてみると、 $k=3$ でも不明瞭ながら、すでにそれらのクラスターが現れていることがわかる。他の地域におけるこれまでの適用例でも、 $k=4$ ですでに収束した解の大局は把握できる。つまり $k=4$ あるいは 5 で十分実用になるわけである。 $k=7$ でも収束しなければ、もはや実質的に計算不能といえる。多重逆解法をもってしても複雑すぎる応力を記録している小断層群という事になるわけである。また、ある応力状態で動いた断層が 3 条しか観察できないならば、 $k=4$ で計算した結果からその応力を検出できないという問題もある。ただしこれは統計的有意性ということからは、検出できなくとも仕方がないともいえる。

解析の手続き

多重逆解法による実際の解析手続きは、次のようなものである。

- ① 露頭において、小断層の走向・傾斜・擦痕の方向・変位のセンスを記載する。これら4つのうち一つでもわからない断層は、解析に使用しない。変位量や断層面の性状など、従来の小断層解析法(平山・垣見, 1965; 岩松・横田, 1989)で行われてきた記載事項も、もちろん漏らさないようにする。擦痕の方向の記載は、方位角と伏角の組でもレイク角でもよい。
- ② 断層スリップデータを標準形式のファイルに変換する。標準形式とは、各断層について、断層面の傾斜方向の方位角・伏角、擦痕の方向の方位角・伏角、変位センスを1行づつならべたテキストファイルである。
- ③ ステレオネットにデータを表示して、傾向をみる。断層面の方向が似通っていても変位方向が大きく食い違うものがあれば、そのデータセットは複数の応力を記録している可能性がある。
- ④ 多重逆解法で処理し、解の収束を確認する。
- ⑤ 可視化ソフトを使って、強調パラメータ e についていくつかの値でプロットさせ、クラスターを識別する。
- ⑥ 認定したクラスターを応力状態として解釈する。
- ⑦ 認定した応力状態が、どの小断層の組み合わせから算出されたか確認する。つまりその応力のおかげで、第(2)式から計算されるスリップ方向と、露頭で観察したスリップ方向との残差が小さい断層を選ぶわけである。そうすると、応力状態によって小断層群をグループ分けできることになる。
- ⑧ 異なるグループごとの相対年代は、断層の切断関係から推定できる。

計算機が必要なのは②から⑦までだが、全体として大規模な計算を要するので、②と③がプレプロセッサ、④がメインプロセッサ、⑤から⑦までがポストプロセッサとして、別々のソフトウェアにしている。役割に応じて、言語はPascal, Fortran 90, C++を使っている。ただし⑦の処理プログラムは開発中である。

ちなみに共役断層法では、露頭において断層のグループ分けができるわけだが、逆解法では膨大な計算の後でしか、それができない。共役断層法では断層面の走向傾斜が応力時階を識別するうえでもっとも重要なクライテリアであるから、特定方向の断層ということを念頭に置いてフィールド調査を行えば、計算するまでもなくグループ分けができる。逆解法が基礎をおいている断層力学では、ほとんどどんな方向の断層面

でも同時に動きうるために、面の方向が応力時階を分ける基準になり得ないのである(三野・山路, 1999)。応力場の相対年代を決めるのは、共役断層法よりも難しくなったわけである。

多重逆解法のみならず、逆解法による小断層解析では、共役断層法より難しくなったことがもう一つある。応力場の空間的变化の把握である。共役断層法ならば、露頭に1対の共役断層があれば、その露頭における主応力軸が決定できる。剪断面角を適当に仮定すれば、1条の断層でさえ可能である。したがって小断層があまり露出しない地域でも、主軸のトラジェクトリを描くことができたわけである。

逆解法では容易ではない。2条の小断層では第2図にみるように、安定な解は得られない。3ないし4条の小断層があれば、計算はできる。しかし不均一な断層スリップデータから応力を分離するには、大体20条の断層が必要である。取得したデータが不均一かどうかは、計算してみないとはっきりしないことが多いから、1露頭で得た数少ないデータから、その露頭を代表する応力状態を決定するのが難しいわけである。それゆえに、多重逆解法を使った古応力測定では、地質ユニットごとにデータを区分して、解析を行なっているのが現状である。応力場の空間的变化を明らかにするには、小断層の分布密度が高い地域で数百条におよぶ小断層を観察する必要があるだろう。

多重逆解法は巨大な計算量を必要とする。そのためアルゴリズムの効率化が重要な課題で、そのためにメインプロセッサのバージョンアップを重ねている。というのも、露頭においてその場で、あるいは宿で一晩のうちに計算結果が出せることが野外調査では重要だからである。その結果、50条程度の断層について $k=4$ 程度で予察的結果をみるのなら、1時間以内で計算できるようになった。しかし解の収束をチェックするには $k=7$ 程度まで計算する必要がある。 $N=50$ で $k=7$ とすると、Pentium II 300 MHz の計算機で計算に4昼夜を要する。

謝 辞

粗稿のわかりにくい点を金川久一氏と越谷信氏に指摘していただいた。多重逆解法には計算機パワーと開発環境の整備が不可欠であった。教室の方々にはその援助をしていただいた。楠橋直氏には卒論のデータを一部使用させていただいた。また資金的援助を科研費(課題番号08308005, 代表岡田篤正)からいただいた。記して感謝の意を表す。

文 献

Angelier, J., 1979, Determination of the mean principal

- directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, **56**, T17-T26.
- Angelier, J., 1984, Tectonic analysis of fault slip data sets. *Jour. Geophys. Res.*, **89**, 5835-5848.
- Bott, M.H.P., 1959, The mechanics of oblique faulting. *Geol. Mag.*, **96**, 109-117.
- ゴールドスタイン, H., 1983, 古典力学 (上). 吉岡書店, 京都, 504 p.
- 平山次郎・垣見俊弘, 1965, 地層中の応力場の解析とその実例について. *地球科学*, **78**, 23-31.
- 岩松 暉・横田修一郎, 1989, 断層調査法—野外における断層のみかた—. 地団研, 東京, 140 p.
- Marrett, R. and Allmendinger, R. W., 1990, Kinematic analysis of fault-slip data. *Jour. Struct. Geol.*, **12**, 973-986.
- 松原 望, 1991, 確率分布. 東京大学教養学部統計学教室 (編), 統計学入門, 東大出版会, 東京, 109-132.
- 松山隆司・和田俊和, 1998, Hough 変換: 投票と多数決原理に基づく幾何学的対象の検出と識別. 松山隆司・久野義徳・井宮 淳 (編), コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ, 東京, 149-165.
- Means, W. D., 1989, A construction for shear stress on a generally-oriented plane. *Jour. Struct. Geol.*, **11**, 625-627.
- 三野浩一郎・山路 敦, 1999, 複数の応力状態を経験した地域における小断層解析: 房総半島の更新統を例として. *地質雑*, **105**, 574-584.
- Wallace, R.E., 1951, Geometry of shearing stress and relation to faulting. *Jour. Geol.*, **59**, 118-130.
- Yamaji, A., 1999, The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Jour. Struct. Geol.*, submitted.
- Zoback, M. D. and Healy, J. H., 1984, Friction, faulting and "in situ" stress. *Ann. Geophys.*, **2**, 689-698.