

2011年11月3日

Multiple Inverse Method Software Package User's Guide 日本語版

京都大学大学院理学研究科
地球惑星科学専攻
山路 敦・佐藤活志

独立行政法人産業技術総合研究所
地質情報研究部門
大坪 誠

目次		6.1 地質断層	18
		6.2 発震機構	19
1	イントロダクション	1	7 解析例
1.1	多重逆解法を使ってチャレンジすべき問題	1	7.1 均一データ
1.2	多重逆解法を利用した研究例	1	7.2 不均一データ
1.3	本ソフトウェアパッケージ	2	7.2.1 最初の例
1.4	本ガイドの構成	2	7.2.2 二番目の例
2	多重逆解法の発展	2	付録 A 用語集
2.1	メインプロセッサ	2	付録 B 断層スリップデータをステレオネットに プロットする 2 つの方法
2.2	ポストプロセッサ	3	付録 C 理論
3	インストールとアンインストール	4	C.1 Wallace-Bott 仮説
4	メインプロセッサ	4	C.2 応力状態
4.1	基本操作	4	C.3 パラメータ空間
4.2	計算量	5	C.4 応力状態の差
5	ポストプロセッサ	6	C.5 応力状態の平均とばらつき
5.1	基本操作	7	C.6 古典的逆解法
5.2	可視化	8	付録 D 多重逆解法の仕組み
5.2.1	メインウィンドウ	8	D.1 計算格子点
5.2.2	データウィンドウ	10	D.2 アルゴリズム
5.3	メニュー項目各説	10	D.2.1 地質断層データの部分集合生成
5.3.1	File メニュー	10	D.2.2 発震機構データの部分集合生成
	Open	11	D.2.3 部分集合のふるい分け
	Export Image	11	D.2.4 計算格子点への投票
	Save Coordinates	11	D.3 断層組み合わせ数
5.3.2	Edit メニュー	11	D.4 ノイズレベルと平均応力角距離
	Copy	11	付録 E 応力比と色との対応関係
5.3.3	Measurement メニュー	11	付録 F 記号一覧
	Misfit Angles	11	参考文献
	Angular Stress Distance	13	索引
	Global Average and Spread	13	
5.3.4	View メニュー	13	
	Enhance Factor	13	
	Dispersion Factor	15	
	Tadpole Symbol	15	
	Change colors	15	
5.3.5	Window メニュー	16	
5.3.6	Help メニュー	16	
5.4	ポストプロセッサによる数値実験	16	
6	データファイルの作り方	18	



Slickenside lineation on a fault plane in a Cretaceous formation, Wakayama, Japan.

謝 辞 東京大学地震研究所共同研究プログラムの参加者との議論は、地震の発震機構に適用できるよう多重逆解法を拡張する上で参考になりました。また、このソフトウェアパッケージを改良および公開するにあたって、科学研究費補助金(基盤(C)(2)14540423)を使用しました。

1 イントロダクション

この文書の目的は、多重逆解法のソフトウェアパッケージの使用法を解説することにあります。多重逆解法の原理については、このガイドの付録および文献 [30, 32, 51] をご覧ください。

多重逆解法は、不均一な断層スリップデータまたは発震機構データから、複数の応力を分離する数値計算法です [51]。この文の言葉がわからなくとも、下ですぐに説明します。また、読み進むために不可欠の言葉については、付録 A の用語集が参考になるでしょう。

1.1 多重逆解法を使ってチャレンジすべき問題

多重逆解法が何か説明するとき、キーワードになるのは、不均一性です。このガイドにおいて、この言葉は、例えば次のような意味で使います。すなわち、ある時ある地域において応力状態が転換したとして、転換前の時代に活動した断層達と転換後に活動した断層達が観察されたものとします。そうした断層群から得られる断層スリップデータを不均一 (heterogeneous) とよびます。単一の応力のもとで動いた断層しか観察していないなら、それらから得られる断層スリップデータは均一 (homogeneous) です。応力状態という言葉は、ここでは特別の意味で使っています。主応力軸と応力比 (p. 8) の値を共有する一群の応力をすべて同一視し、ひとつの応力状態 (state of stress たたは stress state) にあるものとします。詳しくは付録 C.2 に説明があります。

上のたとえは、応力状態が時間的に変化した場合でしたが、実際には対象とする地域の中で空間的に変化する場合もあるでしょう。また、時間的にも空間的にも変化する状況もあるでしょう。いずれにせよ、問題とする断層を動かした応力状態がひとつではなかった場合、それらの断層から得られるデータは不均一であるとよぶことにします。そして不均一なデータは、応力状態の不均一性を理解する手がかりになることが期待されます。応力状態が時間的・空間的に連続的に変化しているという描像を単純化して、応力状態が均一とみなせる時間的・空間的領域が複数あるとしましょう。それらの領域から得られたデータからは、複数の応力状態が検出されなければなりません。そしてそれぞれの応力状態がどの時間・空間領域から得られたかがわかれば、応力状態の空間的・時間的変化が把握できたことになりま

す。均一なら、断層群を動かした応力状態は、古典的逆解法 (付録 C.6) を使って簡単に計算できます。多重逆解法

を使って、ノイズを含む均一データをことも当然できません。その方法を、§7.1 で説明します。均一の場合の対処、これは 1970 年代に片付いた問題です [1, 2, 6, 12, 44]。多重逆解法が解こうとしているのは、不均一の場合、どうやって断層を動かした複数の応力を検出するかという問題であり、また、データが不均一かどうかどうやって知るかという問題です。

個々の断層の活動時期がわかれば、時期によってデータを分けて、均一になったデータの部分ごとに応力を調べればすみます。しかし、地質断層の場合は活動年代の推定が簡単ではありません。露頭やボーリングコアなどにみられる断層達を対象とすると、不均一なデータであることを想定しておくべきです。そもそも地質断層を材料にして地質時代の応力を調べる目的は、応力場が地質学的時間スケールで変化したことを前提として、過去の応力を知ろうということ、これが目的でしょう。

応力状態の時間的・空間的変化を解明しようとするなら、データは不均一であることを前提にすべきです。データを時間または空間で分割して、分割して得られたデータの部分集合が均一になるようにすれば、古典的逆解法でも応力状態の時空的变化がわかります。しかしその場合、分割された結果としてのデータの部分集合が不均一なら、古典的逆解法では最良の場合でさえひとつの最適解が得られるだけです。やはり、均一なデータからひとつの応力状態を検出でき、不均一なデータからは複数の応力状態が同時に検出できる方法があれば、能率がいいわけです。

1.2 多重逆解法を利用した研究例

多重逆解法ははじめ、第四紀と新第三紀の小断層に適用された後 [19, 41, 50]、日本国内でいろいろな時代の小断層群に適用されています [15, 16, 17, 18]。海外でもさまざまな地域あるいは地質体に利用されています。例えばアジアでは、アナトリア・ザクロ山脈・バイカル湖周辺・ヒマラヤ西部の新生代の断層に [7, 8, 9, 21, 22, 34]、そしてヨーロッパでは中生代はおろか [13, 39, 40]、先カンブリア紀の断層にまで使われています [46]。南米チリや南極でも使われました [10, 45]。また、三波川変成岩やメランジュのなかの断層に適用し、付加体深部の現象を解明するツールとしても使われました [24, 27]。断層破砕帯のなかの剪断面に応用した研究例もあります [4]。また、傾動補正ソフトウェア [42] を併用することにより、褶曲帯などの大きく傾動した岩体で、傾動運動と応力場変遷との関係を検討することもできます [63]。また、定

方位のボーリングコアでみられる剪断面から断層スリップデータを取得し、本手法により応力場変遷を研究した例もあります [48, 29]。文献 [60] は、コアからデータを取得する手続きを解説しています。

最近では、地震の発震機構を断層スリップデータに変換したうえで多重逆解法により震源域の応力の不均一性を検討した研究もあります [14, 33, 57]。発震機構の2つの節面のうちのいずれが断層面か、明示的に示したデータに変換したということです。

メインプロセッサがバージョン5からバージョン6になって、不均一な発震機構データから複数の応力が検出できるようになりました [32]。多重逆解法のアルゴリズムを工夫することで、どちらの節面が断層面かという問題を直接解くことを避けて、不均一データを処理することができるようになったわけです。

1.3 本ソフトウェアパッケージ

このソフトウェアパッケージは、メインプロセッサ、ポストプロセッサ、データ変換プログラム、サンプルデータ、そしてそれらの働きを助けるファイル群から構成されます。また、英語版とこの日本語版のユーザーズガイドが含まれています。メインプロセッサは、地質断層および発震機構のデータの両方を処理します。その計算結果を可視化・解析するのが、ポストプロセッサです。ポストプロセッサは豊富な機能を持ち、複数の応力が検出されたなら、個々の断層がどの応力で動かされた可能性が高いか検討する手段をも提供します。それにより、断層群を応力ごとにグループ分けできるわけです (§5.3.3)。ある断層が他の断層に切られているなら、それらの相対年代が分かります。したがって、それらを動かした応力の相対年代をも制約できることになります。

ポストプロセッサが表示した図は、拡大しても劣化しないベクトル画像として、メタファイルに保存することができます。このファイルを Adobe Illustrator のようなドロー系ソフトで線の太さや色など様々に加工できますので、論文やレポートの図に利用してください。このガイドで使っている図の多くは、そうして作ったものです。

1.4 本ガイドの構成

多重逆解法の本ソフトウェアパッケージを初公開したのが2004年です。それ以来、アルゴリズムの見直しやパラメータ空間の変更などにより、バージョンアップを重ね、能力を向上させてきました。その経過を次の §2 で簡単に説明します。

ソフトウェア自体の使用法を説明するのが、§3~§5 で

す。§3 では、本ソフトウェアパッケージのインストールとアンインストールの方法を述べます。§4 では、メインプロセッサについて説明します。ポストプロセッサは、さまざまな機能を持っています。§5 で、それらを説明します。

本ソフトウェアパッケージを利用するには、ソフトウェアが処理可能な、特定の書式をもったデータファイルを、ユーザーが作成しなければなりません。§6 でその書式について説明します。

均一なデータを処理する場合は、ひとつの応力状態しか検出されず、結果の解釈は明確です。不均一データの場合は、試行錯誤しながら結果を解釈する必要があります。ポストプロセッサを使ってそれをどう実行するか、§7 で説明します。

付録 A は用語集で、多重逆解法に限らず応力テンソルインバージョンを利用する際に、知っておくべきいくつかのを簡単に説明しています。ステレオプロットで断層スリップデータを表す方法を、付録 B で解説します。多重逆解法ソフトウェアパッケージを基礎づける理論を付録 C で説明し、メインプロセッサが何をやっているか、アルゴリズムを付録 D で解説します。付録 F には、本ガイドの数式で使う記号の一覧表をかかげます。

2 多重逆解法の発展

多重逆解法は1990年代末に開発されました [49, 51]。フリーのソフトウェアとしての初公開が2004年です。公開時のバージョン番号は、メインプロセッサもポストプロセッサも4でした。

2.1 メインプロセッサ

公開のために行ったメインプロセッサのバージョン3から4への改良は、Sato and Yamaji [37] による計算格子点の改良で、分解能を向上させたものです。この改良は、応力状態を表現するパラメータ空間を根本的に見直すことにより実現されました [36, 38]。

バージョン5への変更では、Otsubo and Yamaji [30] のアルゴリズムを採用することにより、ノイズの低減・分解能の向上・計算時間の短縮を実現しました (図1)。メインプロセッサのバージョン6への変更点は、Otsubo et al. [32] のアルゴリズムにより、地震の発震機構を扱えるようになったことです [31]。地質断層の処理については、バージョン5から変更ありません。地質断層の場合のバージョン5の分解能については、文献 [30] が報告しています。Liesa and Lisle [20] が分解能を評価したのは、

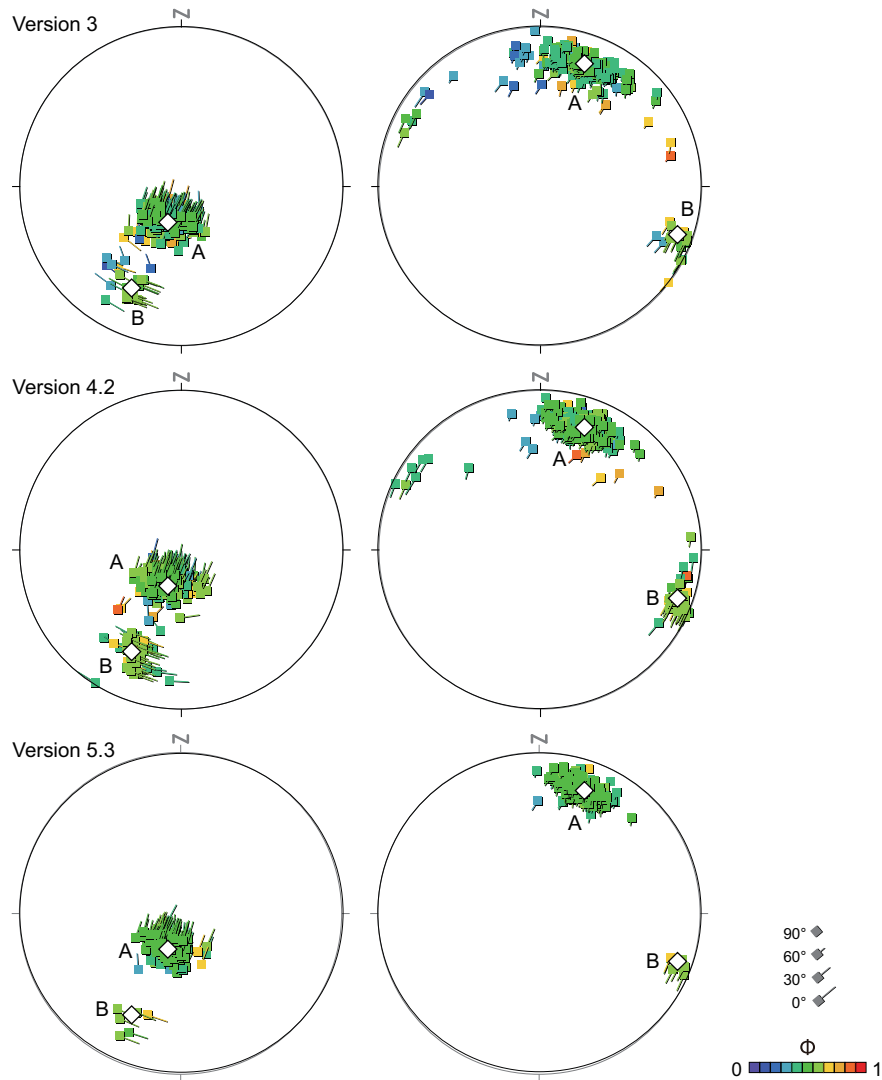


図1 応力が既知の人工不均一データにメインプロセッサ・バージョン 3, 4, 5 を適用した結果の違い。菱形マークがは、正解として検出されるべき応力主軸の方向。正解の応力比は、A と B それぞれ 0.5 と 0.6。

メインプロセッサ・バージョン 3 でした。計算格子点は、最近また改良されました [62]。

図 1 の例で、人工データを作る際に仮定した応力比は、応力 A が 0.5、応力 B が 0.6 でしたが、これらの応力比は緑と黄緑の点でペアのステレオグラムに表示されます。応力 A と B をあらかずクラスターが、それらの色のみで構成され、コンパクトなクラスターであるほど、2 つの応力がよりよく識別されたこととなります。バージョン 3 では、紺色からオレンジ色までみられ、2 つのクラスターの間にも点がプロットされていますが、バージョン 5 になると緑以外の色がほとんどなくなり、クラスターもコンパクトになったことがわかります。

多重逆解法にはこのように能力の進歩があるため、ご

利用いただいた結果を記述して論文や報告書にまとめる際には、メインプロセッサのバージョン番号を明記しておく、のちのち役に立つでしょう。

2.2 ポストプロセッサ

公開以来、ポストプロセッサには大きな変更がありません。ただし、バージョン 4.14 から 4.15 になり、それまで Stress メニューのもとにあった測定機能群と表示機能群に分け、それぞれ Measurement と View というメニューの下に移しました。また、2 つの応力状態のあいだの差異を測定する機能を加えました。付録 C.4 で説明する、応力角距離 [61] を測定する機能です。また、バージョン 4.16 では、Mohr ダイアグラムを描画する機能が加わりました。応力状態を指定すると、その応力により

各断層面に作用する法線応力と剪断応力を表示する機能です。

3 インストールとアンインストール

このソフトウェアパッケージは、最低条件として次のようなパソコンで利用することができます。

- Pentium (200 MHz).
- 128 MB RAM.
- 7 MB 以上の空きディスク容量.
- Windows 98/NT4 以降

ようするに、2000 年ころのパソコンでも動くということですが、Windows 7 でも利用できます。64 ビット版 Windows で問題なく動きます。また、Parallels Desktop^{*1} を使って Mac 上で本パッケージを動かしているという、Mac ユーザーからの報告がありました。

インストールは簡単です。このソフトウェアパッケージは、Windows のレジストリを書き換えません。パッケージは、次の URL で公開しています：

www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-bs/tsg/software/ そこからファイル mim6_4.zip をダウンロードして、適当なフォルダに解凍してください^{*2}。それでもう、多重逆解法ソフトウェアパッケージを使うことができます。

2 つの実行ファイル mim60.exe および mim4.exe が、それぞれメインプロセッサとポストプロセッサの本体です。通常の Windows ソフトウェア同様、ダブルクリックすることにより、それらを起動することができます。Windows のスタートメニューから起動できるようにすると便利ですが、その設定法については、オペレーティングシステムのヘルプを見てください。

アンインストールも簡単。本ソフトウェアパッケージを納めたフォルダを、フォルダごとゴミ箱に移動してください。

4 メインプロセッサ

このソフトウェアパッケージには、2 つの実行ファイル mim4.exe と mim60.exe が含まれていますが、それらはメインプロセッサのバージョン 4 とバージョン 6 のプ

ログラムです。前者は、地質断層で bedding tilt test または褶曲テストをする場合のみ使用してください [63]。普通はバージョン 6 を使います。このセクションでは、以下、バージョン 6 の使用法を説明しますが、バージョン 4 の使い方も基本は同じです。

4.1 基本操作

メインプロセッサは、断層スリップデータまたは発震機構データを読み込んで、多重逆解法の処理 (付録 D) を施し、計算結果をテキストファイルに出力します。ポストプロセッサは、そのファイルを読み込んで、多重逆解法の結果を可視化します。データファイルの作り方は、§6 で説明しています。

メインプロセッサは、コンソールプログラムであり、mim60.exe を起動すると図 2 のような DOS ウィンドウが現れます。実行ファイル mim60.exe をダブルクリックして起動することもできますし、次のようにして起動することもできます。すなわち XP 以前の Windows では、スタートメニューから「ファイル名を指定して実行」を選び、ファイル名に cmd を与えると、コンソールウィンドウが現れます。Windows Vista では、スタートメニューの「検索の開始」欄に cmd と入力すれば、コンソールウィンドウが出てきます。そこで、mim60.exe が置かれているフォルダにディレクトリを移動して mim60 とタイプし、Enter キーを押せば起動できます^{*3}。

計算の開始手順は次の通りです。

1. メインプロセッサを起動すると、直ちにデータファイルを読み込む段階になります。すなわちファイルの選択画面が現れるので、目的のデータファイルを指定します。
2. するとまた直ちに、計算結果を出力するファイルを指定する画面が現れるので、ファイル名を与えて「保存」をクリックします。ファイル名には、mi4 というファイル拡張子が自動的に付きます。既存ファイルと同一の名前を指定すると、そのファイルを書き換えてよいか尋ねてきますので、コンソール画面上で yes なら「y」と、no なら「n」とタイプして Enter キーを押します。後者なら、実行が終了します。
3. 次にコンソール画面上で、データの種別を指示します。地質断層のデータなら「1」を、発震機構のデータなら「2」をタイプして Enter キーを押します。

^{*1} Windows のソフトウェアを Mac 上で動かすための、Parallels 社の Mac 用ソフトウェア。

^{*2} ソフトウェア・アーカイブの URL が変更になる場合があります。上記の URL でつながらない場合は、山路のホームページから探し始めてください。

^{*3} こうすると、メインプロセッサが表示するエラーメッセージをみることができます。

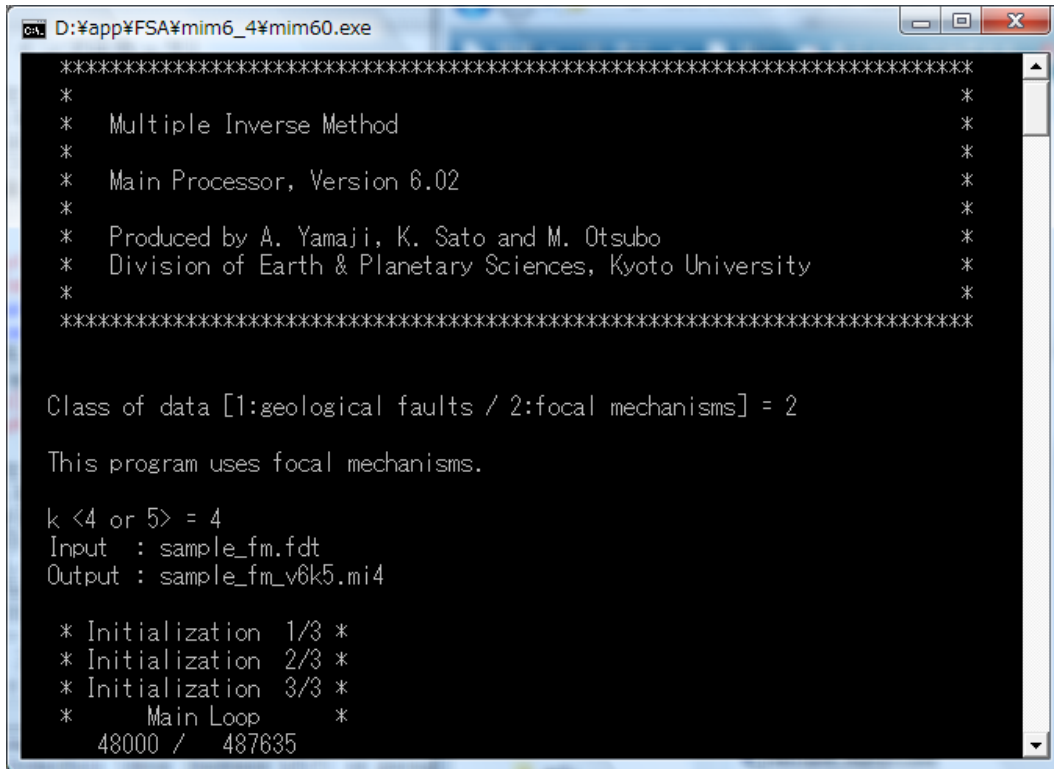


図2 発震機構データを処理しているときのメインプロセッサ (version 6.02) の実行画面。

4. 続いて断層組み合わせ数 k を入力します。地質断層の場合は、**k =** という表示につづけて、3 以上 8 以下の整数をタイプし、Enter キーを押して入力します。発震機能の場合は、**k <4 or 5> =** の表示に続けて 4 または 5 を入力してください (付録 D.3)。 k の値は、これらの範囲に限られ、それ以外の値を入力すると、エラーメッセージが表示され、もう一度値を入力するよう促されます。

これらがすむと、メインプロセッサは計算を開始します。

計算が始まると、コンソールウィンドウには、入出力ファイル名と処理の進捗状況が表示されます。図 2 の

```
Input : sample_fm.fdt
Output : sample_fm_v6k5.mi5
```

の部分は、入出力ファイル名を示しています。ウィンドウの最下行の分数 4800/487635 は、計算がどこまで進捗したか、表しています。この場合、繰り返し計算の $4800/487635 \approx 1\%$ が終わったという意味です。分母は §4.2 で説明する ${}_N C_k$ の値で、分子は 1000 ずつ増えてゆきます。これが 100% になれば、後は結果を出力ファイルに書き込んで処理が終了します。ファイル出力はこの

繰り返し計算に比べたら無視しうる時間しかかかりません。したがって、この分数の増大と時計とを見比べて、終了時間が予想できます。

計算が終了すると、コンソールウィンドウが自動的に閉じます。ただし、メインプロセッサをコンソール画面の中から起動していた場合には、計算が終了してもコンソール画面は消えないので、メインプロセッサが出力するエラーメッセージを読みみたいときに便利です。途中で処理をキャンセルする場合は、ウィンドウの右上の **✕** 印をクリックして、ウィンドウを閉じてください。

断層組み合わせ数 k は、普通は 5 が適当です。断層数が多ければ (例えば、100 条)、4 でもいいでしょう。ただし現バージョンで扱える断層数には上限があります (表 1, §4.2)。

4.2 計算量

多重逆解法ができた 2000 年頃、多重逆解法の計算は、パソコンの能力をフルに使って何日もかかる仕事でした。今日のパソコンでは、安価なものでも、多重逆解法の計算をかんたんにこなすことができます。地質断層の場合について、計算に要する時間を説明しましょう。データ数が同じなら、発震機構の場合は、その約倍の時間を要

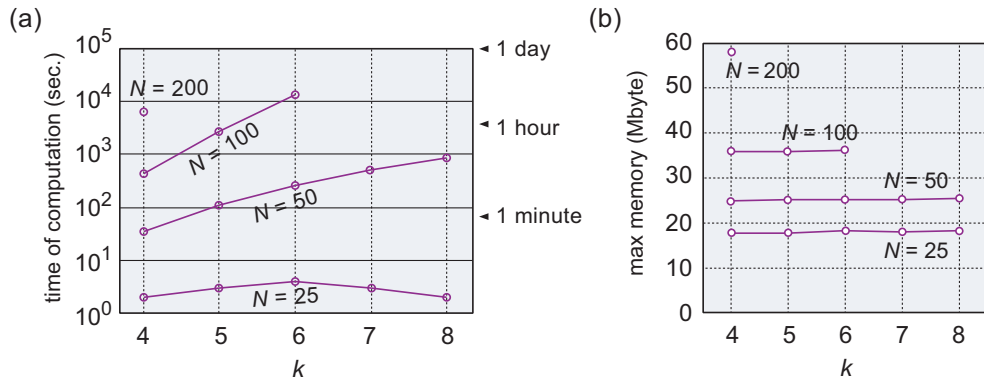


図3 メインプロセッサ (version 5.31) が計算に要する時間とメモリー．測定に用いたパソコンは、Pentium IV, 2.4 GHz, メモリー 512 MB を搭載したもの．

表1 断層組合わせ数 k に対する現バージョンのメインプロセッサで処理できるデータ数の上限．FSD: 断層スリップデータ, FMD: 発震機構データ．

k	3	4	5	6	7	8
FSD	499	269	122	75	55	44
FMD		238	96			

します．

計算時間は、データ数 N と断層組み合わせ数 k に依存します (付録 D.3)．メインプロセッサは、応力テンソルインバージョンを 最大で ${}_N C_k$ 回実行します．ただし、

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

です．メインプロセッサが受け取る k の値は、たかだか 8 です． ${}_N C_k$ の値は $N \gg k$ ならほぼ N^k のペースで増大します．つまり、データ数が多ければ、計算にたいへんな時間がかかるということです．とはいえ、最近のパソコンは速いので、計算時間が仕事の制約になることは、あまり無いと思います．

最大でというのは、こういうことです．バージョン 4 までは、実際に ${}_N C_k$ 回の繰り返しをしていましたが、Otsubo and Yamaji [30] のアルゴリズムを実装したバージョン 5 以降は、それよりだいぶ計算量が少なくて済むようになりました．どれだけ減るかはデータに依存し、不均一性の大きなデータほど、計算量は小さくなります (p. 34)．場合によっては、何桁も小さくなることもあります．

図 3 は、計算に要する時間とメモリーの目安になるでしょう．そこに示された計算時間は旧式のパソコンで測

定したものなので、最新のパソコンならこの図より小さい時間ですむはずですが、 N^k は k に関して単調増加し、グラフは下に凸になります。図 3(a) では折れ線グラフが上に凸になっており、 $N = 25$ の場合に $k \geq 6$ で右下がりになってさえます。その理由は、計算の繰り返し回数を間引く Otsubo and Yamaji [30] のアルゴリズムが効果を現しているためです (付録 D)。

現バージョンのメインプロセッサは、扱える断層数には、表 1 に示す上限があります。地質断層ではなく発震機構なら、その半分です。精確には、 ${}_N C_k < 214,743,647$ という制限です^{*4}。図 2(a) において、 $N = 200$ の場合に $k = 4$ の場合しかプロットされていないのは、 ${}_{200} C_5$ がこの制限を超えるからです。

5 ポストプロセッサ

ポストプロセッサは様々な機能を持っていますが、最も重要な機能は、左右ペアになったステレオグラム (等積投影図) を使って、メインプロセッサの計算結果を可視化する機能です (図 4)．そのために、ポストプロセッサは MI Viewer という名前がつけられています。

§5.1 では、メインプロセッサが出力したファイルを読み込んで可視化するまでの基本的操作を解説します．そして表示された結果の見方を §5.3 で説明します．§5.2 では、ポストプロセッサの様々な機能を、メニュー項目ごとに示します．

^{*4} この制限は、これはプログラムが 32 ビット符号付き整数を使っていることからくる制約です．将来のバージョンで撤廃します．

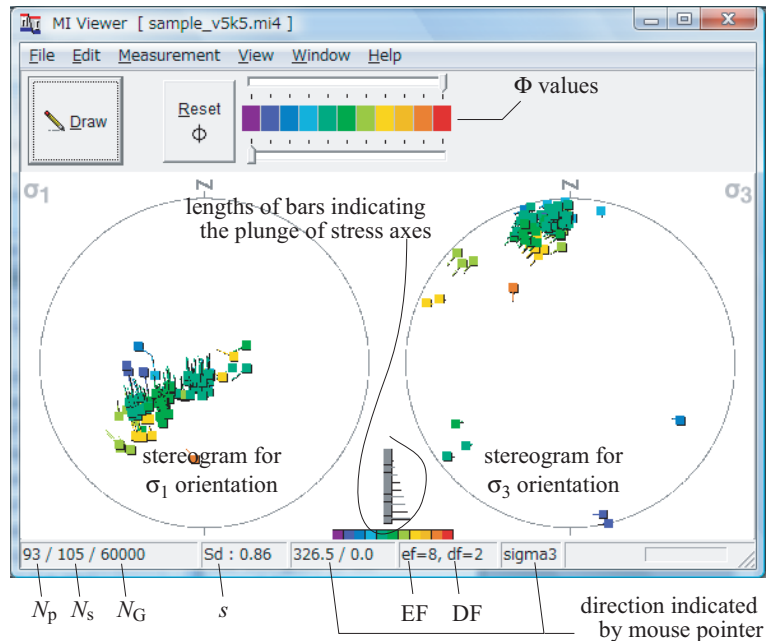


図4 ポストプロセッサ (MI Viewer) のメインウィンドウ。メインプロセッサの計算結果は、2つのステレオグラム (下半球等積投影図) に示される。 N_p の定義は式 (3)、 N_s はメインプロセッサが出力した応力状態が何種類かを表し、 N_G は計算格子点数。 s の定義は式 (2)。EF と DF は、それぞれ enhance factor と dispersion factor。

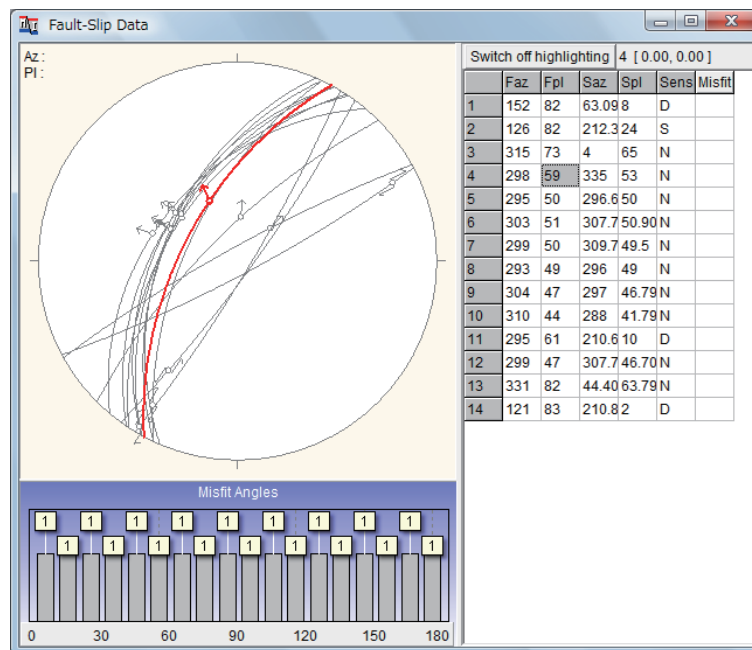


図5 ポストプロセッサのデータウィンドウ。断層スリップデータが、左上のステレオグラム (下半球等角投影図) と右のリストに表示されている。リスト上で第4番のデータがステレオネット上では赤線でハイライト表示されている。左下はミスフィット角のヒストグラム。

5.1 基本操作

ポストプロセッサの実行ファイルは、miv4.exe です。このプログラムを起動すると、メインウィンドウ (図4)

とデータウィンドウ (図5) という2つのウィンドウが現れます。前者のタイトルバーには MI Viewer、後者のタイトルバーには Fault-Slip Data と書いてあります。起動

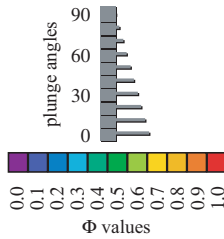


図 6 メインウィンドウのペアのステレオグラムの下には、応力比を示すカラーバーとプランジ角を示す灰色のオタマジャクシ記号が示される。

直後、データウィンドウはメインウィンドウの下に半分隠れています。両者のいずれを上置きか（アクティブウィンドウにするか）は、メインウィンドウの Window メニューから選択することができます。メインウィンドウが隠れている場合は、**[Alt]+[W]**とタイプすると、このメニュー項目が現れます。

ポストプロセッサが出力したファイルを可視化するには、次の手順で進みます。

1. 実行ファイル `miv4.exe` を起動。
2. メインウィンドウの File メニューから Open をクリックし、ファイルを読み込む。
3. メインウィンドウ上の **Draw** ボタンをクリックし、左右 2 つのステレオグラムに計算結果を表示 (図 4)。表示のためのパラメータを変えても、このボタンを押さない限り、表示は変わりません。§5.3 で説明する機能を使った応力の分離作業。
4. メインウィンドウ上の File メニューから Exit を選ぶと、プログラムが終了する。

データファイルを多数回読み込むと、ポストプロセッサがフリーズすることがまれにあります。その場合はポストプロセッサをいったん終了し、再起動してください。キーボードで **[Alt]+[F]** の次に **[X]** と押すと終了します。それでだめなら、ポストプロセッサを強制終了してください。

5.2 可視化

ポストプロセッサは、多重逆解法の結果を可視化する機能、そしてまたその他の機能によって、データが記録している応力状態達の情報を引き出す役割を果たします。ウィンドウごとに、表示結果の見方を説明します。

5.2.1 メインウィンドウ

メインウィンドウ上のペアになったステレオグラムは、検出された応力状態を表します (図 4)。それぞれのステレオグラムにはオタマジャクシ (tadpole) 状の記号が多数プロットされています。それらをオタマジャクシ記号とよぶことにします。1 匹のオタマジャクシが 1 つの応力状態を、次のように表現します。

まず、オタマジャクシの色が応力比

$$\Phi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (1)$$

を表します。ただし、圧縮を正符号の応力として、 $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$ であるとします。この大小関係のために、 Φ の値は 0~1 の範囲に限定され、 $\Phi = 0$ なら軸性圧縮応力 $\sigma_3 = \sigma_2 \leq \sigma_1$ 、 $\Phi = 1$ なら軸性伸張応力 $\sigma_3 \leq \sigma_2 = \sigma_1$ であることを意味し、応力比がそれらの中間なら三軸応力を表すこととなります (図 38)。メインウィンドウ上では、応力比の値は 0.1 きざみの 11 段階の色で区別されます。**Reset** ボタンの右側と 2 つのステレオグラムの下に、同じ 11 色の組み合わせからなるカラーバーがありますが (図 4)、その左端と右端がそれぞれ応力比が 0 と 1 の場合の色を表します (図 6)。カラーバーの例えば 3 番目の色は、応力比が 0.2 の場合の色です。

同じ色のオタマジャクシ記号で、尾の長さや方向が同じものが、ステレオグラム上でクラスターをなしているならば、そのクラスターは与えられた断層スリップデータにとって有意な応力をあらわします。つまり、不均一な断層スリップデータから分離された複数の応力は、そうした複数のクラスターで表現されるわけです。

オタマジャクシ記号は、応力状態を、次のようにして表しています。左右ペアのステレオグラムは、両方とも下半球等積投影図ですが、左のステレオグラム上では、オタマジャクシの頭の位置が σ_1 軸の方向を表します。そしてオタマジャクシの尾の向いている方向が、 σ_3 軸の方位角を表し、尾の長さが σ_3 軸の伏角を表します。伏角に反比例した長さの尾が描かれており、 σ_3 軸が直立しているなら、長さゼロになります。ペアのステレオグラムの下に灰色のオタマジャクシ記号が 10 個描かれていますが、それらは尾の長さや伏角の大きさの関係を表す凡例で、 0° から 90° まで 10° ごとの関係が描かれています (図 6)。右側のステレオグラムでは、オタマジャクシの頭と尾の役割が逆になっています。つまりネット上の頭の位置が σ_3 軸の方向を表し、尾の向きと長さが σ_1 軸の方位角と伏角とを表しています。このように、オタマ

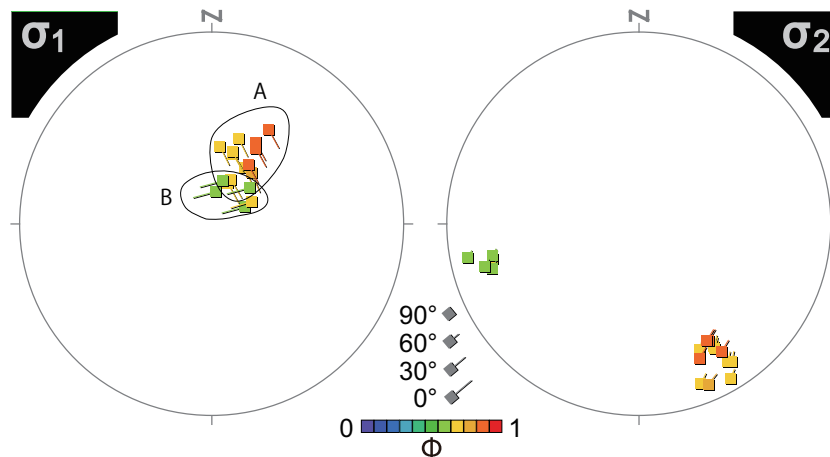


図7 オタマジャクシ記号の「尾」のおかげで、2つのステレオグラムにプロットされた点の対応関係がわかる。

ジャクシ記号をプロットすることにより、多数の応力状態が表示されているなかで、おのおのの応力状態を区別できるように工夫したわけです。つまり、片方の主軸方向が同じでも他方の主軸方向が異なるなら、尾の向きと長さなどでそれらの応力状態を明瞭に区別することができます。例えば図7の場合、 σ_3 軸を表示する右のステレオグラムでは、明瞭に2つのクラスターが分かれています。しかし、 σ_1 軸を表示する左のステレオグラムでは、ひとつながりのクラスターが現れています。しかし、左のステレオグラムでAとBの曲線で囲ったオタマジャクシ記号達は、尾がそれぞれ右下と左向きでやや下を向いています。したがって、A群とB群のオタマジャクシ達が表す応力の σ_3 軸は、それぞれSE象限とSW象限にプランジしていることがわかります。色で表される応力比の情報なしに、こうして左右のステレオグラムにプロットされた点の対応関係がわかるわけです。すなわち、いろいろな色のオタマジャクシ達が混在しているクラスターでも、尾の方向でこうし対応がつけられる。図7では、左のステレオグラムでは、黄色のオタマジャクシ記号はA群にもB群にも含まれますが、尾の方向でどちらのグループに属するものか判断できるわけです。これが、オタマジャクシ記号を使う利点です。

メインウィンドウの下部には、ステータスバーがあります。図4の場合、93 / 105 / 60000 と書かれた行がそれです。中央部の 326.5 / 0.0 という表示は、ステレオグラム上でマウスポインターの現在位置が指す方位角 (326.5°) と伏角 (0.0°) とを示しています。また、その右には、ポインターが載っているのが左右どちらのステレオグラムかを表示します。左なら sigma1, 右なら sigma3

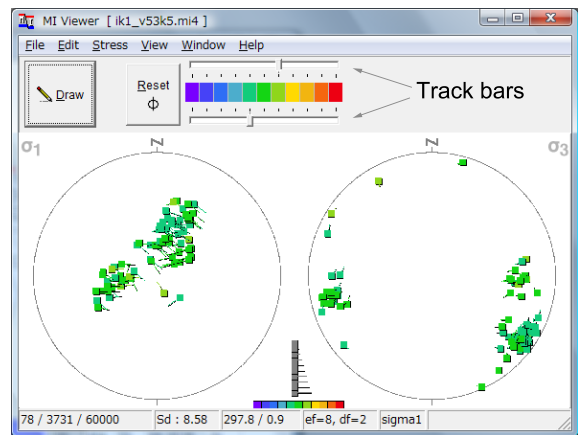


図8 2つのトラックバーのうち、上の方はペアのステレオグラムに表示する応力状態の Φ 値の上限、下の方は Φ 値の下限を制御する。この場合、応力比が 0.4 ~ 0.6 の応力状態のみが、ステレオグラムにプロットされている。

と表示されます。マウスポインターを動かすと、それらの表示がリアルタイムに変化します。ポインターがステレオグラムから出ると、出た時点の数値が表示されたままになります。それらの数値により、クラスターの方位角と伏角とを読み取ることができます。ステータスバーの他の項目については、§5.3 で解説します。

メインウィンドウ上部には、応力比 (Φ 値) を表すカラーバーが描画されており、その上下には水平方向に伸びるトラックバーが配置されています。これをマウスで動かして、**Draw** ボタンを押した結果が図8です。オタマジャクシ記号で表示する応力状態の Φ 値を、0.1 きざみで好きな範囲に限定できるわけです。この図8のメインプロセッサには、図4と同じデータがロードされてい

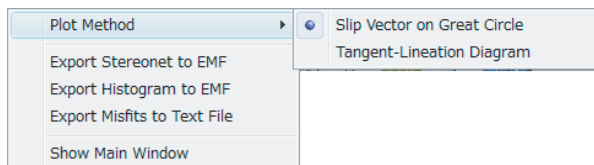


図9 データウィンドウ上で右クリックすることで表示されるポップアップ・メニュー。

ますが、上下のトラックバーの操作により、応力比が0.4~0.6の範囲の応力状態しかプロットされていません。

5.2.2 データウィンドウ

データウィンドウには3つのパネルがあります(図5)。左上のパネルには計算に使った断層スリップデータが下半球等角投影で示されます。ステレオネットの左上の2つの数値は、ネット上でのマウスポインタの指す方位角と伏角とを示します。同じ断層スリップデータは、右の表にFDT形式で表示されます。左下の棒グラフは、後述の方法でメインウィンドウ上で指定された応力状態でそれらの断層がずべるべき方向と、実際に観察されたスリップ方向とのミスフィット角のヒストグラムです。右側のデータ一覧表の右端の列に、個々の断層のミスフィット角が示されます。

このリストは、FDT形式でデータを示しています (§6)。1行がひとつの断層データを表しており、いずれかの行をクリックすると、その行に対応する断層がステレオネット上で赤色でハイライト表示されます。この機能を使えば、表とステレオネットとで、データの対応関係が分かるわけです。ハイライト表示を消すには、リストの上の **Switch off highlighting** というボタンをクリックしてください。

データウィンドウの上で右クリックすると、図9のポップアップメニューが現れます。最初の項目 Plot Method には2つのサブメニュー項目があり、断層スリップデータをステレオネットに表現する2つの方法を選択することができます。付録Bで説明する2つの図法です。Slip Vector on Great Circle というサブメニュー項目を選ぶと、断層面を大円で表示する流儀でプロットされます。他方を選ぶと tangent-lineation diagram になります。図5の断層スリップデータを tangent-lineation diagram で表示し直した場合を図10に掲げます。

図9のポップアップメニューで、Export... という項目を選ぶと、データウィンドウに表示された内容をファイルに保存することができます。一番下の Show Main

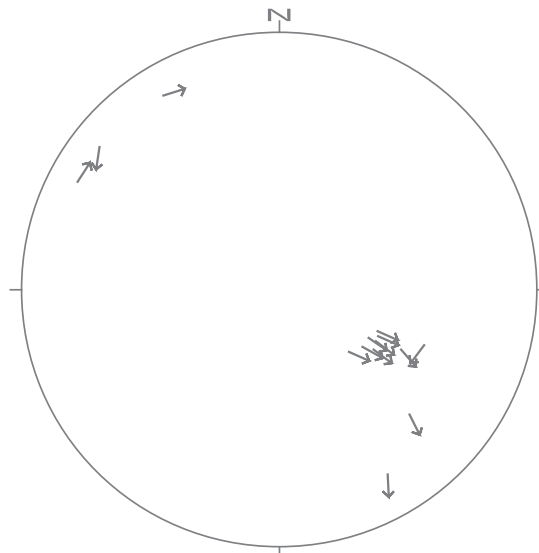
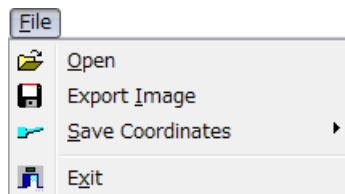


図10 Tangent-lineation diagram で図5と同じ断層スリップデータを表示。

Window をクリックすると、メインウィンドウがアクティブウィンドウ^{*5}になります。メインウィンドウが他のウィンドウで隠されているときにこの機能を使ってメインウィンドウを表示させることができます^{*6}。

5.3 メニュー項目各説

以下に説明するポストプロセッサの豊富な機能により、ユーザーは対話的に解析作業をすすめることができます。以下、メニュー項目ごとに解説します。



5.3.1 File メニュー

ポストプロセッサを始めて立ち上げた段階では、FileメニューはExitが最終項目になっています。読み込んだファイルの名前は、メインプロセッサを格納したフォルダーの中の prevfiles.txt というテキストファイルに記録されます。次回起動したときには、Exit欄の下にメニュー項目としてそれらのファイル名が現れるので、それらのファイルを迅速に読み込むことができます。

この prevfiles.txt はテキストファイルであり、デー

^{*5} モニターに表示されている複数のウィンドウのうち、最上層に表示され、入出力が可能になっているウィンドウ。

^{*6} [Alt]+[W]とタイプするだけでも、どのウィンドウをアクティブにするかを選択する機能呼び出せます。

タファイルのディレクトリとファイル名が記録されています。エディター等で閲覧・編集ができます。存在しないディレクトリやファイル名が記入されていると、MI Viewer を起動したとき、エラーメッセージが出ます。その場合は、このファイルの問題箇所を訂正するか削除してください。ファイル prevfiles.txt 自体をディスクから削除しても大丈夫です。MI Viewer を起動すれば、ふたたび prevfiles.txt というファイルが作られます。

Open ファイルを読み込むときにクリックします。ポップアップするファイル・オープン・ダイアログを通じて、メインプロセッサの出力したどのファイルを読み込むか指定します。ファイルを読み込んで、メインウィンドウの **Draw** ボタンを押すまで、オタマジャクシ記号は表示されません。

Export Image このメニュー項目を通じて、メインウィンドウに表示された絵は、ベクトル画像とラスター画像、いずれか好みの形式で保存することができます。この項目をクリックするとただちにファイル保存ダイアログが現れるので、ファイル名を与え、「ファイルの種類」欄で Enanced metafile (*.emf) または Jpeg file (*.jpg) を選択してください。前者で保存したベクトル画像は、Illustrator や Canvas などのドローソフトで読み込んで、論文や報告書にふさわしくなるように、美しく加工することができます*7。Jpeg の方を選ぶと、JPEG 形式のラスター画像として保存することができます。

Save Coordinates 表示されたオタマジャクシ記号に対応した応力状態を、テキストファイルに書き出すためのメニュー項目です。この項目の下には、Principal Axes and Stress Ratios および Reduced Stress Tensors という2つのサブメニュー項目があります。前者が選択されると、各オタマジャクシ記号の表す応力状態の σ_1 軸の方位角と伏角、 σ_3 軸の方位角と伏角そして応力比が書き出されます。テキストファイルの各行がオタマジャクシ1匹に対応します。表示されているオタマジャクシ記号の数は N_p 個なら、 N_p 行のデータになります。Reduced Stress Tensors の方の場合は、各オタマジャクシが表す規格化応力テンソル(式8)の成分 $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{22}, \sigma_{23}, \sigma_{33}$ が、この順で書き出されます*8。ユーザーが独自にブ

*7 Arial Greek や Hellas Arial という、ギリシャ文字の無料の TrueType フォントがあります。それらを使うと、見栄えのよい図になります。

*8 バージョン 4.10 までの MI Viewer は、Orife-Lisle テンソル [26] の成分を出力していました。このテンソルの成分は、式(8)の σ の成分の $\sqrt{2/3}$ です。

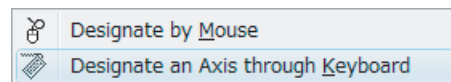
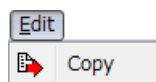


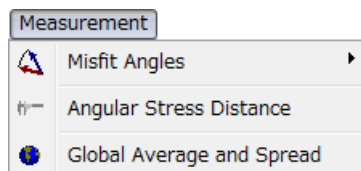
図 11 Misfit Angle の下の2つのサブメニュー項目

ログラムを書けば、書き出されたデータを使って統計解析ができるでしょう。



5.3.2 Edit メニュー

Copy メインウィンドウに表示された絵は、このメニュー項目を通じてクリップボードにコピーすることができます。ドローソフトにペーストすれば、すぐにその絵を編集できるわけです。



5.3.3 Measurement メニュー

Measurement メニューの下には、応力状態を指定して、何らかの量を測定する機能が集められています。メインプロセッサのバージョン 4.14 まで Measurement メニューの下にあった項目の一部を、現バージョンでは次の View メニュー (§5.3.4) のもとに移動しました。

Misfit Angles ポストプロセッサは、簡単な数値計算の機能を持っており、このメニュー項目から、その機能を起動します。この項目を選ぶと、応力状態を指定するよう促されます。指定すると、データウィンドウに表示されている断層が、その応力状態でどの方向に動くか計算され、各断層のミスフィット角とともにデータウィンドウに表示されます。また同時に、各断層面に作用する法線応力と剪断応力が計算され、Mohr ダイアグラムが描画されます。ミスふっと角とは、観察したスリップ方向と、計算された理論スリップ方向とのなす角のことです(付録 C.1)。この角度が、後述のように、断層を応力ごとに分類する基準として利用できるので、この Misfit Angles から起動される数値計算機能の利用法について、§5.4 で詳しく説明します。

応力状態は、メインウィンドウ上で指定します。このメニュー項目の下には、Designate by Mouse と Designate an Axis through Keyboard という2つのサブメニュー項

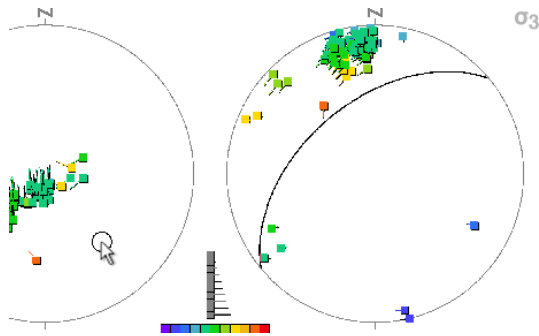


図 12 応力主軸の方向を指定する最初のモードでは、メインウィンドウ上でマウスポインターの先端に小さな円が描かれ、ステレオグラム上でその方向を極とする大円が、もう一方のステレオグラムに描かれる。小さな円とそれを極とする大円は、マウスの動きに追従して移動する。

目があり (図 11)、いずれかを選ぶことにより、応力状態指定モードに入ります。まず、Designate by Mouse をクリックした場合について説明します。

ひとつの応力状態を指定するには 3 段階の操作が必要です。2 つの主応力軸の指定と、それに続く応力比の指定です。Designate by Mouse を選ぶと、マウスポインターの先端に図 12 のように円が現れます。同時にステータスバーの一番右の欄に Designate 1st Axis という表示が現れます。上記の 3 段階の最初のステップであることを示しています。マウスポインターの先端の円は、ポインターと一緒にペアのステレオグラム上を動きます。その間、ステータスバーには、ステレオグラム上におけるマウスポインターの位置の方位角と伏角が示されます。図 12 の状態でステータスバーに sigma1 と書かれているのは、マウスポインターが左側のステレオグラム上にあるからです。右側のステレオグラム上であれば、そこには sigma3 と表示されます。

さてこの例では、マウスポインターは左のステレオグラム上にありますが、右のステレオグラムには黒色の大円が描かれています。この大円は、マウスポインターが示す方向を極とする大円で、ポインターの移動に追従して大円も動きます。マウスポインターが所望の位置に来たならば、左クリックしてください。そうすると、指定すべき 2 つの主軸方向のうちの最初のものが指定されたことになり、次の主軸方向を指定するモードに遷ります。そして、今指定した主軸方向にはマウスポインターの先端にあった円が残され、他方のステレオグラムにはそれを極とする大円が残されます。

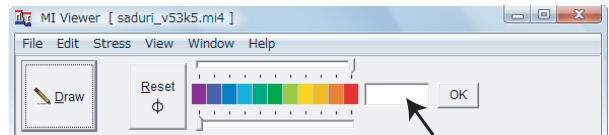


図 13 応力比指定モードのときのメインウィンドウ。矢印のところに応力比の値を数値で入力するか、またはその左にならぶ色のどれかをクリックして、応力比を指定する。

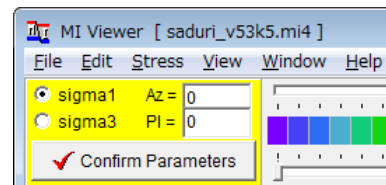


図 14 応力主軸の方向を数値で指定するためにメインウィンドウに現れるパネル。

他方の主軸の方向は、必ずこの大円上にあるので、第 2 の主軸方向を指定するモードになると、この大円の上をマウスの動きに合わせて小さな円が動くようになります。この円を所望の位置に持って行って左クリックすると、第 2 の主軸方向が指定されたことになり、最後の第 3 モード、すなわち応力比を指定する段階に遷ります。

応力比指定モードになると、メインウィンドウの上部のカラーバーの右横に、 Φ 値を数値で入力する窓 (図 13 の矢印) が現れます。ここに基キーボードから数値を入力して OK ボタンを押せば、応力比を指定したことになります。応力比を指定するもうひとつの方法は、Reset ボタンの右側のカラーバーのうち、適当なひとつの色の四角形を左クリックすることです。この場合、当然、0.1 刻みの値しか指定できません。例えば $\Phi = 0.2$ を指定したければ、左から 3 番目の箱をクリックします。カラーバーの左から i 番目の箱は、応力比 $\Phi = 0.1 \times (i - 1)$ を表します。つまり応力比は、0.1 きざみの精度でしか指定できないようになっています。応力比がこのように指定されると、応力状態指定モードが解除されます。

Designate an Axis through Keyboard をクリックして応力状態を指定することもできます (図 11)。その場合、応力状態を指定する最初のモード、つまり応力主軸の最初のものの方を指定するにあたって、マウスポインターを使わずに、キーボードから数値を入力して指定するところが、Designate by Mouse の時との違いです。このメニュー項目を選ぶと、メニューバーの下に図 14 の

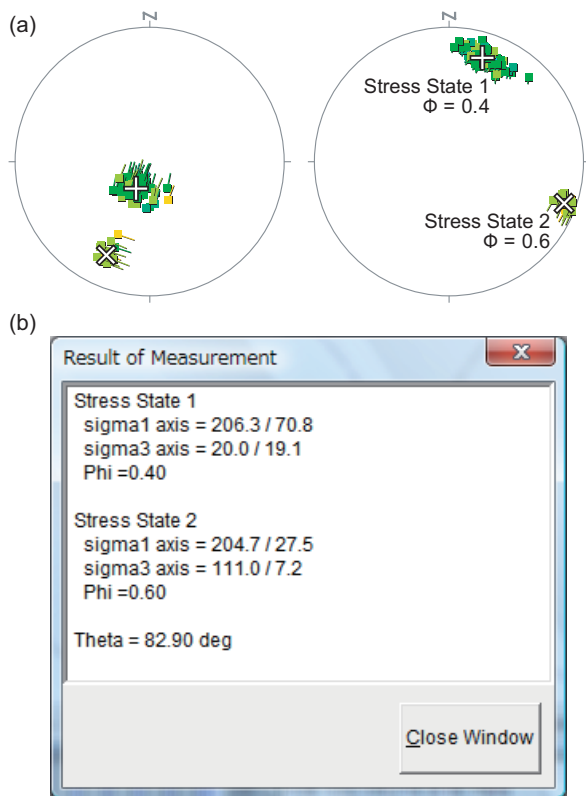



図 15 (a) 応力比が 0.4 と 0.6 である 2 つの応力状態 1 と 2 . 主軸方向が + と x で示されている . (b) Measurement メニューから Angular Stress Distance を選ぶことにより指定した、尾状状態 1 と 2 のあいだの応力角距離 (Θ) が、最後の行に示されている .

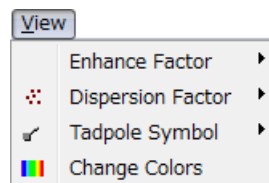
ような黄色のパネルが現れます . そのパネルの左半分には、あなたが今指定しようとするのが σ_1 軸であるか σ_3 軸であるかを指定するラジオボタン  が配置されていますので、sigma1 または sigma3 のいずれかをマウスでクリックして指定してください . $Az =$ と $Pl =$ の右側の空欄には、その主軸の方位角と伏角をキーボードから入力してください . 入力した数値に応じて、ステレオグラム上には小さな円とそれを極とする大円とが描かれます . 正しい方向を指定したら **Confirm Parameters** というボタンをクリックして、この最初の主軸を指定するモードを終了してください . そうすると、次の主軸方向を指定する第 2 モードに遷り、マウスポインターの動きに合わせて上記の大円上を小さな円が動くようになりますので、あとはメニュー項目 Designate by Mouse を選んだときと同じ手順で残りの操作を行い、応力状態を指定します .

Angular Stress Distance ノギス型アイコンのついたこのメニュー項目を選ぶと、2 つの応力状態のあいだの

応力角距離 (付録 C.4) を測定することができます . 結果は、図 15 のダイアログウィンドウに表示されます . このダイアログの内容は、コピー・アンド・ペーストで、他のソフトウェアに移すことができます . 測定結果を示すウィンドウには、指定した 2 つの応力の方位角/伏角と Φ 値が示され、その下に応力角距離 Θ が角度の度単位で示されます .

Global Average and Spread Measurement メニューの下のこの項目をクリックすると、図 16 のようなダイアログが現れます . これは、メインウィンドウにオタマジャクシ記号として表示された応力状態達の統計量を示しています . オタマジャクシ記号のおおのが、1 個の応力状態をあらわすわけですが、メインウィンドウに表示されている N_p 個のの応力状態達の平均として得られる応力状態が、Average のところに示されています . この平均的応力状態の主応力軸の方位角・伏角と Φ 値です . Spread の下の mean stress difference \bar{D} と mean angular stress distance $\bar{\Theta}$ の値が、その分散にあたる量で、これらが大きいほどばらつきが大きいことを意味します . これらの量の定義は、C.5 にあります .

これらの量は、地質データの褶曲テストに用いることができます [63] . しかしそれらの値は、強調ファクター (e) によって変わるので、特定の e 値を選んで $\bar{\Theta}$ または \bar{D} を計算させるとよいでしょう . 例えば $e = 0$ です .



5.3.4 View メニュー

このメニューの下の機能を使って、応力状態をオタマジャクシ記号を使って表現する仕方を調整することができます .

Enhance Factor メインウィンドウのペアのステレオグラムには多数のオタマジャクシ記号がプロットされますが、プロットする総数を強調ファクター (enhance factor) によって調節するのが View メニューの下のこのメニュー項目の目的です . この項目の下には図 17 のようなサブメニューがあって、そこに示された数が強調ファクターの値を示します . この図で 12 のところにチェックマークが付いているのは、現在この値が 12 に設定されていることを表しています .

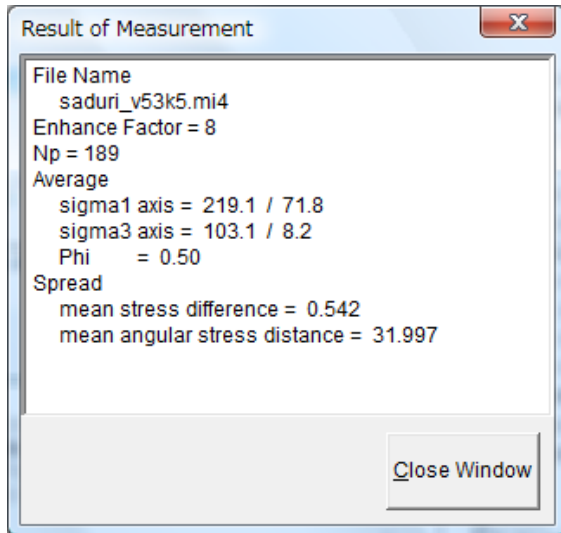


図 16 メインウィンドウのオタマジクシ記号達によって表示された、規格化応力テンソル達の統計値(付録 C.5)を表示するダイアログ。主応力軸の方向は、方位角と伏角で示されている。最後の 2 行は、 \bar{D} と $\bar{\Theta}$ 。後者は角度の度単位。

強調ファクターは、下のように定義されます。メインプロセッサは、入力された断層データの集合から多数の部分集合を生成し、それぞれについて最適な応力状態を計算します。多数の応力状態を、メインプロセッサが解として出力するということです。このソフトウェアパッケージは、 $N_G = 60000$ 個の格子点を持つ計算グリッドを内部で用いていて、それら各点が別々の応力状態を表しています。解として得られる応力状態は、60000 通りの応力状態のどれかとして表現されるわけです。

選挙のたとえを使って説明します。上記の部分集合を有権者とみなし、それぞれが 1 表ずつ N_G 人の候補者のいずれかに投票するとしましょう。その結果、第 i 番の候補者に $m^{(i)}$ 票入ったとします。得票数が多いのはごく少数の応力状態で、大多数の応力状態はわずかな票を受け取るにすぎません [51]。そこで、得票数の標準偏差を s とします。すなわち、

$$s^2 = \frac{1}{N_G - 1} \sum_{i=1}^{N_G} [m^{(i)} - \bar{m}]^2. \quad (2)$$

もちろん \bar{m} は平均得票数で、

$$\bar{m} = \frac{1}{N_G} [m^{(1)} + \dots + m^{(N_G)}].$$

です。メインウィンドウのステータスバーには Sd という欄がありますが(図 4)、そこに示されるのが s の値

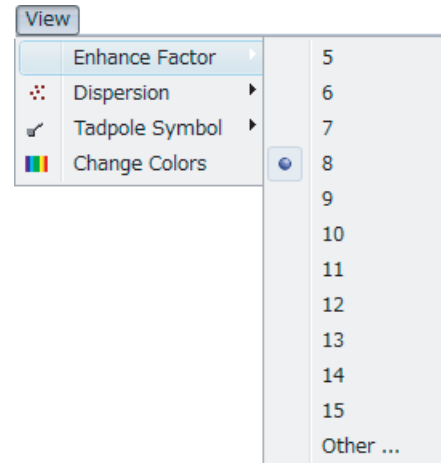


図 17 強調ファクターとして 5~15 以外の値を指定するには、Other... を選択する。8 がデフォルト値。

です。

ステレオグラムには、第 i 番の応力状態について $m^{(i)} / \max(es, 1)$ 個のオタマジクシ記号がプロットされるのです。ここで正の数 e が強調指数です。分母の $\max(es, 1)$ は、積 es が 1 より小さければ 1 を、そうでなければ es を出力する関数です。分母はいずれにせよ 1 以上なので、この割り算によってプロットされるオタマジクシ記号の数は $m^{(i)}$ 個より少なくなります。つまり、メインプロセッサが出力した膨大な数の応力状態をすべてプロットするとステレオグラムが埋め尽くされてしまうことがあるので、この比をとることによって間引いて、クラスターになっているところだけを強調して表示しようというわけです。このポストプロセッサでは、強調ファクターの値は 100 未満の自然数に制限されています。ただし図 17 のサブメニューから選べるのは 5 から 15 までで、それ以外の値は Other... の項目を選べばキーボードを通じて入力できます。

各応力状態には上述の個数のオタマジクシ記号がプロットされますから、プロットされるオタマジクシ記号の総数は

$$N_p = \left\lfloor \frac{m^{(1)}}{\max(es, 1)} \right\rfloor + \dots + \left\lfloor \frac{m^{(N_G)}}{\max(es, 1)} \right\rfloor \quad (3)$$

です。ただし $\lfloor x \rfloor$ は、正の数 x の少数部分を切り捨てて得られる整数です。

式 (3) から明らかのように、強調ファクターの作用を打ち消して、オタマジクシ記号を間引かずに表示させるには、 e 値として 0 を選びます。

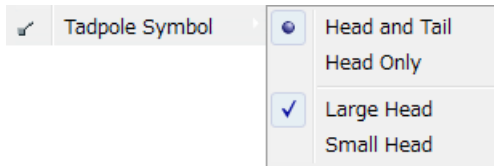


図 18 オタマジャクシ記号の持つ属性を変更するためのサブメニュー。

Dispersion Factor 前項で説明したように、メインウィンドウのペアのステレオグラム上には、第 i 応力状態という 1 つの応力状態に対して $m^{(i)} / \max(es, 1)$ 個のオタマジャクシ記号がプロットされます。それらのオタマジャクシ記号はすべて同じ主軸方向を持ちます。したがってそれらが重複してプロットされると、 $m^{(i)} / \max(es, 1)$ 個でなく 1 個のオタマジャクシ記号がプロットされたように見えてしまいます。それではクラスタの密度がわからないので、オタマジャクシ記号の位置を、正しい位置のまわりにばらまくようにプロットするようになっています。広範囲にばらまくと、クラスタの位置がぼやけることとなります。View メニューの下の Dispersion Factor という項目には 0, 1, 2, 3 という 3 つのサブメニュー項目があって、その数が大きいほどオタマジャクシ記号をばらまく広範囲が大きくなります。0 を選ぶと、ばらまかずに正しい応力状態の位置にプロットされます。

Tadpole Symbol このメニュー項目の下には図 18 のサブメニュー項目があり、尾を描くか否か、頭のサイズをどうするか、選択することができます。尾は主軸方向を把握するのに役立ちますが、プロットしたことで煩雑になる場合もあるでしょう。また、出版用の図を作成する場合には、頭が大きい方が見栄えがいいようです。

Change colors 応力比の値は、メインウィンドウの上で 11 段階の色の違いで表現されます^{*9}。それらの色と応力比との対応関係 (カラースキーム) は、View メニューの下の項目 Change Colors から変更できます。この項目を選ぶと図 19 のようなダイアログボックスが現れます。色は RGB 三原色の明るさが 0 から 255 までの整数で一覧表示され、それらの RGB 値に対応した色が、垂直なカラーバーに示されています。Old の下には、これまで使ってきたカラースキームの RGB 値が、New の下には、新たに設定したカラースキームのそれが示されています。

^{*9} 応力比と色との間のデフォルトでの対応関係は、MI Viewer のバージョンが 4.15 から 4.16 になる際、若干変更されました。詳しくは付録 E をご覧ください。

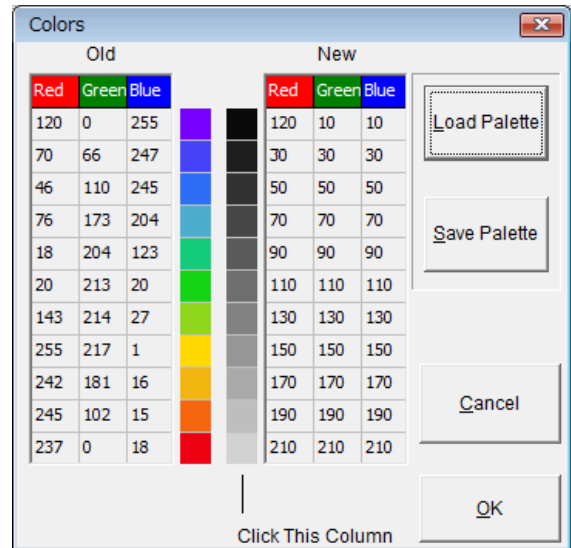


図 19 応力比の値ごとにカラーを割り当てるカラーパレットとその変更のためのダイアログ。

カラースキームを変更するには、Click This Column と書かれたカラーバーのなかのどれかの四角を左クリックしてください。色を指定するための OS の標準ダイアログが現れるので、それを使って新たな色を指定することができます。

自作のカラースキームは、図 19 の Save Palette ボタンをクリックすると、ファイルに保存することができます。RGB 値が 16 進表記に変換されて、拡張子が pal になったテキストファイルに保存されます^{*10}。また、すでにそのようにして保存したカラースキームを読み込んで利用することもできます。それには、図 19 の Load Palette ボタンをクリックして、目的のファイルを選んでください。本ソフトウェアパッケージに含まれる grayscale.pal を選択すると、グレースケールで応力比を表すようになります。カラーではなくグレースケールの図で出版したいという場合に利用してください。

カラースキームの変更が終わったら、図 19 の OK ボタンを押してください。新しいスキームでオタマジャクシ記号を再プロットするには、メインウィンドウの Draw ボタンを押してください。

^{*10} このソフトウェアパッケージには、pal という拡張子をもつファイルが 4 つ添付されています。MI Viewer がデフォルトで使用するカラースキームは、ファイル rainbaw0.pal に記録されたそれと同一です。

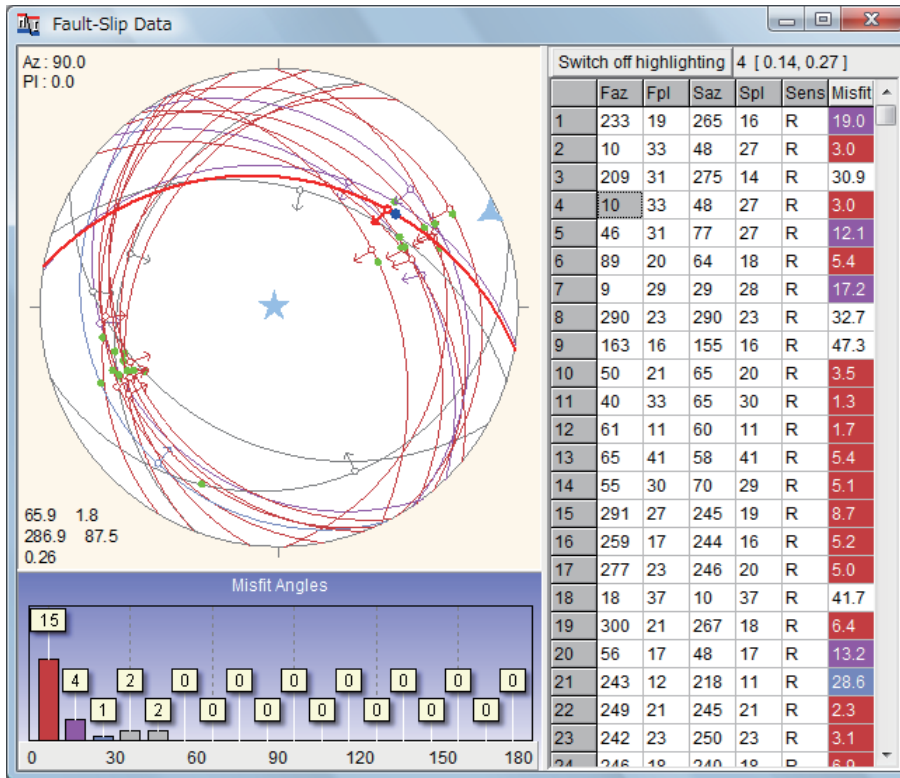
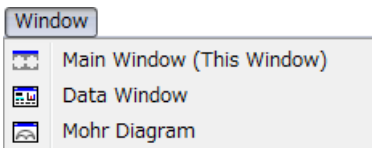


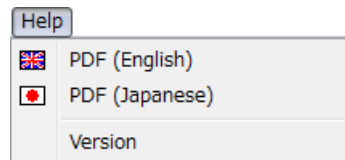
図 20 ステレオネットおよびデータ一覧表に示された 24 条の断層が、指定された応力状態のもとで、どの方向に動くか計算した結果が、データウィンドウに示されている。その応力状態は、ステレオネットの左下に数値で示されている。すなわちこの例では、 σ_1 軸の方位角と伏角が 65.9° と 1.8° 、 σ_3 軸では 286.9° と 87.5° 、応力比が 0.26。それらの主軸方向は、ステレオネット上で、それぞれ▲および★という記号で表示されている。緑の丸印は理論スリップ方向だが、○は正断層センスを、●は逆断層センスを意味する。データ一覧表の最右列には、ミスフィット角が示され、左下にはミスフィット角のヒストグラムが描かれている。



5.3.5 Window メニュー

メインウィンドウとデータウィンドウと Mohr ダイアグラム表示ウィンドウと、どれを一番手前に表示させるかを、このメニューから選択します。Mohr ダイアグラム表示ウィンドウは、起動した時点では隠されていて、§5.4 の数値実験を行うと、自動的に表示されるようになります。

これら 3 つのメニュー項目は、キーボードで **Alt+W** とタイプすることによっても、表示させることができます。メインウィンドウが MI Viewer の他のウィンドウで隠されていても、このキーボード操作からこのメニューが呼び出され、3 つのウィンドウのなかで必要なものを手前に表示させることができます。



5.3.6 Help メニュー

Help メニューの下には、3 つの項目があります。2 番目の PDF (Japanese) を選ぶと、この User's Guide が表示されます。1 番目の PDF (English) を選ぶと、その英語版が表示されます。Version をクリックすると、ポストプロセッサのバージョンが示されます。

5.4 ポストプロセッサによる数値実験

メニュー項目 Misfit Angles をクリックすると、簡単な数値実験ができます (図 20)。この機能は、不均一な断層スリップデータから応力を分離するために、必要不可欠な機能であり (§7)、それを対話的に実行できることが、従来にない本プログラムパッケージの利点です。

数値実験というのは、ある応力のもとで、データウィ

ンドウに示されている断層達がどのように振る舞うかを見る実験です。ユーザーが p. 11 の手続きで応力状態を指定すると、MI Viewer は各断層について、

- 理論スリップ方向 (付録 C.1)
- ミスフィット角 (付録 C.1)
- 法線応力と剪断応力 (付録 C.1)

を計算し、結果を図にして表示します。ミスフィット角とは、実際に観察されたスリップ方向と理論スリップ方向が何度ずれているかを表す量です。これら 3 つの計算機能について、詳しく説明しましょう。

応力状態が指定されると、MI Viewer は直ちにデータウィンドウに各断層の理論スリップ方向をステレオネットにプロットします。図 20 のステレオネットのなかの緑の丸印が、その方向です。そして、ミスフィット角がデータリストの最右列に示されます。その列の背景の色は、ミスフィット角 d の大きさに対応していて、赤は $d < 10^\circ$ 、スミレ色は $10^\circ \leq d < 20^\circ$ 、水色は $20^\circ \leq d < 30^\circ$ 、白は $d \geq 30^\circ$ です。ステレオネットにプロットされた、断層面の方向を表す大円も、それらの色になっています。データリストの欄をクリックすると、その行のデータに対応するステレオネット上の大円が、赤く太い線でハイライト表示されます。この機能を使うと、どんな姿勢の断層がその応力で説明できるか、などのことがわかるでしょう。

ステレオネットの下には、ミスフィット角のヒストグラムが表示されます (図 20)。この図は、ほぼ均一なデータの処理例なので、最適応力を指定すると、24 条の断層のうち 19 条のミスフィット角が 20° 以下になり、その応力でデータがほぼ説明できていることがわかります。このヒストグラムで、ミスフィット角が小さいところと大きいところにピークが現れるようなら、指定した応力はデータの一部を説明するものの、それでは説明できないデータも少なからずあることを示します。つまり、データは不均一であるということが、このヒストグラムからわかるわけです。

図 20 と同じデータを tangent-lineation diagram として示したのが図 21 の太い矢印達です。やはり、ミスフィット角の大きさが、赤・スミレ色・青・灰色で識別できるようになっています。より淡い灰色で、細線の矢印が、また、多数かつ多様な姿勢の仮想的断層面を想定したとき、それらの理論スリップ方向が細線で明灰色の矢印で表現されています。それらにデータを示す矢印が沿っている

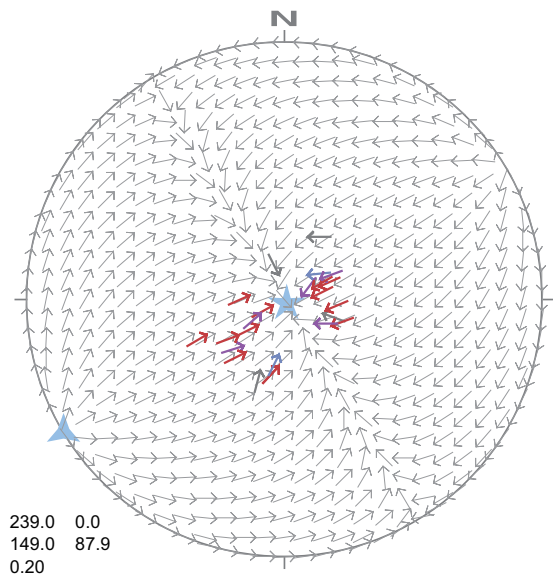


図 21 Tangent-lineation diagram. 観察した断層の下盤の運動方向をふと矢印で示すが、その内容は、図 20 のステレオネットと同一。太矢印の色分けは、図 20 のミスフィット角のそれと同一。格子状に配置された薄い灰色の矢印群は、指定された応力状態での仮想的断層のスリップ方向を示す。

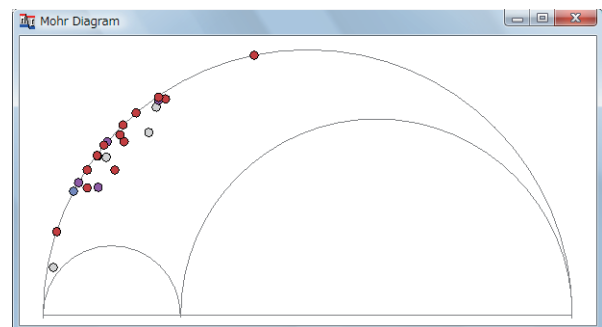


図 22 メインウィンドウで応力状態を指定することにより、その状態により各断層面に生ずる法線応力と剪断応力が、Mohr ダイアグラムにプロットされる。ここにプロットされるデータ点には、データウィンドウに表示されるミスフィット角に対応した色が塗られている。灰色の線で描かれている 3 つの Mohr 円の直径は、もちろん $\Phi : (1 - \Phi) : 1$ という比になっている。

ならば、ミスフィット角は小さいということです。

理論スリップ方向やミスフィット角とともに、指定した応力状態により各断層面に生ずる法線応力と剪断応力も計算されます。ただし、付録 C.1 で説明するように差応力で規格化された値です。そしてそれらが、Mohr ダイアグラムに表示されます。図 23 がその例です。データウィンドウのデータ一覧表をクリックすることにより、

σ_N	σ_S
0.122	0.327
0.151	0.297
0.226	0.403
0.251	0.297
...	...
0.148	0.297
0.175	0.379
0.114	0.316

図 23 Mohr ダイアグラム表示ウィンドウからテキストファイルに出力された、各断層面上の法線応力 σ_N と剪断応力 σ_S が 1 行ずつ書き出される。法線応力と剪断応力は無次元化されているので(付録 C.1), 前者は 0 と 1 のあいだ, 後者は 0 と 0.5 のあいだの値になっている。

特定のデータを指定すると、指定された断層面に対応する Mohr ダイアグラム上の点が、ハイライト表示されます。同時に、データウィンドウの **Switch off Highlighting** ボタンの右にそれらの値が小数点以下第 2 位まで表示されます(図 20)。

データウィンドウに表示された数値実験の結果は、ウィンドウ上で右クリックすることにより、ファイルに保存することができます。このポップアップメニューの Export で始まる 3 つの項目がそのためのものです。Export Stereonet to EMF と Export Histogram to EMF は、それぞれステレオネットとヒストグラムの表示内容を enhanced metafile 形式で書き出すコマンドです。Export Misfits to Text File は、データ一覧表の最右列のミスフィット角をテキストファイルに書き出すためのコマンドです。

Mohr ダイアグラムの表示内容をファイルに保存するには、やはり、ダイアグラムの上で右クリックし、ポップアップメニューを表示させてください。Mohr ダイアグラムは enhanced metafile として保存できますし、規格化された法線応力と剪断応力は、図 23 のようにテキストファイルに保存できます。このファイルの各行が、断層 1 条の法線応力と剪断応力に対応していて、各行の第 1、第 2 項目が規格化法線応力と規格化剪断応力です。

6 データファイルの作り方

メインプロセッサは、2 種類のデータファイルを読み込むことができます。地質断層用と、地震の発震機構用です。ともに ASCII テキストファイルです。

(a)

152.0	82.0	63.1	8.0	D	↓	①
126.0	82.0	212.4	24.0	S	↓	②
315.0	73.0	4.0	65.0	N	↓	③
298.0	59.0	335.0	53.0	N	↓	④
295.0	50.0	296.6	50.0	N	↓	⑤
303.0	51.0	307.8	50.9	N	↓	⑥
299.0	50.0	309.8	49.5	N	↓	⑦
293.0	49.0	296.0	49.0	N	↓	⑧
304.0	47.0	297.0	46.8	N	↓	⑨
310.0	44.0	288.0	41.8	N	↓	⑩
295.0	61.0	210.6	10.0	D	↓	⑪
299.0	47.0	307.8	46.7	N	↓	⑫
331.0	82.0	44.4	63.8	N	↓	⑬
121.0	83.0	210.8	2.0	D	↓	⑭

f_{az} f_{pl} S_{az} S_{pl} sense

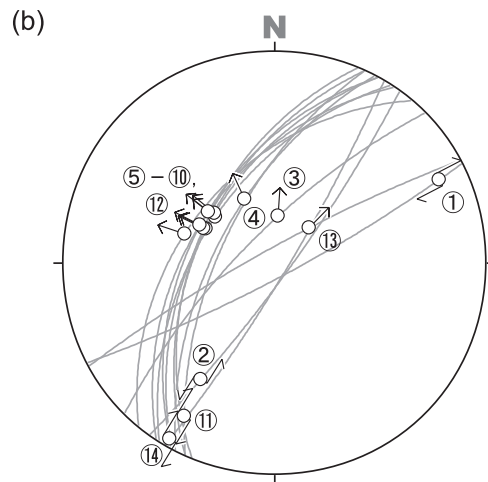


図 24 (a) FDT ファイル形式の例。1 行に 1 条分の断層スリップデータが記述されている。(b) 下半球等角投影で示した (a) の断層スリップデータ。丸数字は (a) のそれと共通の番号。大円上の丸印が断層条線の方向を表し、丸印に添えられた矢印が断層の変位センスを表す(図 5)。

6.1 地質断層

露頭やボーリングコア^{*11}から収集したデータの場合、1 条分の断層スリップデータがテキストファイルの 1 行を占め、各行のデータは後述の FDT 形式で記述されます(図 24(a))。ファイルは fdt というファイル拡張子を持ちます。地域ごとに、あるいは露頭の層準ごとにファイルにまとめると、解釈が楽になるでしょう、このファイルを FDT ファイルとよびます。

FDT 形式は、次の構造を持ちます。各行は、4 つの正符号の数値とアルファベット 1 文字と、必要ならそれに

^{*11} ボーリングコアから断層スリップデータをとる方法は、文献 [60] に解説があります。

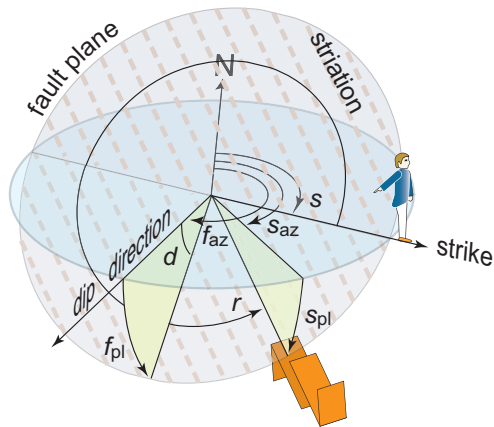


図 25 FDT 形式で使う断層面と擦痕の方向を表す 4 つの角 f_{az} , f_{pl} , s_{az} , s_{pl} と、発震機構の記述に使う 3 つの角 s , d , r . 断層面の傾斜方向と直交方向に向かい、なおかつ右側が断層面の傾斜方向になるように立ったとき、正面の方位が断層面の方位 s . スリップ方向のレイク r は、断層面を上からみて、この走向方向から反時計回りに測る . この場合、左ずれ成分を含む斜めずれ正断層なので、 $270^\circ < r < 360^\circ$. 断層面の傾斜 d は f_{pl} と等しい .

続いて注釈からなります . 空白の行があると、エラーとなります . 4 つの数値は、断層面の方位角 (f_{az}) と傾斜角 (f_{pl})、断層擦痕の方位角 (s_{az}) と伏角 (s_{pl}) の 4 つが、この順番で並んでいます . 角度の単位はもちろん度です . 方位角 f_{az} および s_{az} は、区間 $[0^\circ, 360^\circ]$ に入っていないとなりません . 伏角 f_{pl} および s_{pl} の範囲は、区間 $[0^\circ, 90^\circ]$ です . 最後の文字データは、N, R, D, S の 4 文字のうちいずれかでなければなりません . それらはそれぞれ、正断層 (normal fault)、逆断層 (reverse fault)、右ずれ断層 (dextral fault)、左ずれ断層 (sinistral fault) の区別を表します . 図 25 の場合は、N ないし S です . 小文字でも大丈夫です . あわせて 5 つの項目は、ひとつ以上の半角空白で区切ります . 注釈を入れる場合、上記のアルファベット 1 文字の後、やはりひとつ以上の半角空白を置いた後から注釈を始めてください .

FDT ファイルを作成したなら、FDT ファイルを読み込んで表示するステレオネットプログラム SFSA [53] を使って、正しく記載できたか、ファイルの内容をチェックしてください .

6.2 発震機構

地震の発震機構データは、地質断層とは違った書式でデータファイルを作らなければなりません . この書式を FMD 形式とよぶことにします . この違いは、発震機構の

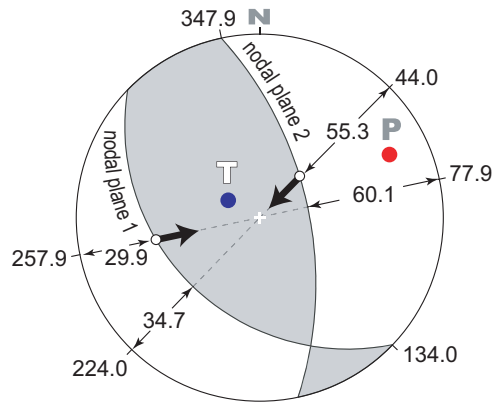


図 26 ひとつの地震の発震機構を表すビーチボールパターン . 下半球等角投影 . 太い矢印は、上盤の運動方向 .

場合に、2 つの節面 (nodal plane) のいずれが断層として動いたか自明ではないことに由来します . 露頭では断層面の方向にそうした不確定性はありえませんが、各発震機構について断層面の方向に 2 つの可能性があるということです .

ひとつ発震機構がもつ節面のいずれも、多重逆解法ではまず断層面とみなして、応力を計算します [32] . そして、必要ならポストプロセッサにより、どちらの節面が断層として動いた可能性が高いかを検討します .

公開されている発震機構のデータは、ひとつの発震機構について次のようなかたちで提供されています . すなわち、ひとつの発震機構の 2 枚の節面を断層と見なしたときの、断層面の方向とスリップ方向です . そしてそれらの情報は、図 25 の s , d , r によって記述されています . 走向の方位は、走向線の上で右側に断層面の傾斜がくるように立ったとしたときの正面の方向です*12 . 例えば図 26 の発震機構の場合、

```
134.0  34.7  61.1 ↙
347.9  60.1 108.5 ↙
```

と記録されます . 第 1 行がこの図の nodal plane 1 のデータ、第 2 行が nodal plane 2 のデータです . このパッケージに含まれるサンプルファイル sample.R2FDT.txt は、この発震機構データを格納しています .

発震機構のデータセットから本ソフトウェアで処理するデータファイルを作る場合、上記のような各地震イベ

*12 走向についてこのような方向付けを、right-hand rule といいます . ただしこれは米国流で、英国ではこれと逆向きのことがあるので要注意 [11] .

	Strike	Dip	Rake	Faz	Fpl	Saz	Spl	Sense
1	134.0	34.7	61.1	224.0	34.7	257.9	29.9	R
2	347.9	60.1	108.5	77.9	60.1	44.0	55.3	R

Number of Data = 2

図 27 データ書式を変換するツール rake2fdat.exe .

ントの2組の $\{s, d, r\}$ を連続する2行に書きます。N個の発震機構データから作ったデータファイルは、 $2N$ 行3列のデータを格納することになります。メインプロセッサは、奇数番目とそれにつづく偶数番目の行のデータをひとつの発震機構データとみなして処理します。3つの数値 s, d, r は、半角スペースで区切ります。そのようにして作ったテキストファイルを、例えば test.txt として保存します。

このテキストファイルを、ソフトウェアパッケージに含まれる rake2fdat.exe というソフトウェアを使って、FDT 形式に変換します。図 27 は test.txt をこのソフトで読み込んだ状態です。Strike, Dip, Rake の列に、test.txt の内容が表示されて、それらから計算した FDT 形式のデータが、各行の後半に出ています。このソフトの File メニューの Save をクリックすると、FDT 形式の部分のみを別のテキストファイルに保存することができます。ファイルの拡張子は、fdat を選びます。もとのファイル test.txt に記入してあった注釈などは、出力ファイルには引き継がれません。ただし、読み込んだテキストファイルと出力するファイルは、1行ごとに対応するので、何行目のデータでかということ、対応付けができます。出力されたファイルでも、連続する2行がひとつの発震機構を表すわけです。

7 解析例

多重逆解法を使って断層スリップデータを処理する作業を、3組のデータを使って説明します。最初の例は、均一に近いデータです。均一に近いデータというのは、例えば均一データに測定誤差が加わることにより生じます。また、応力状態が時間的または空間的に少しだけ揺らい

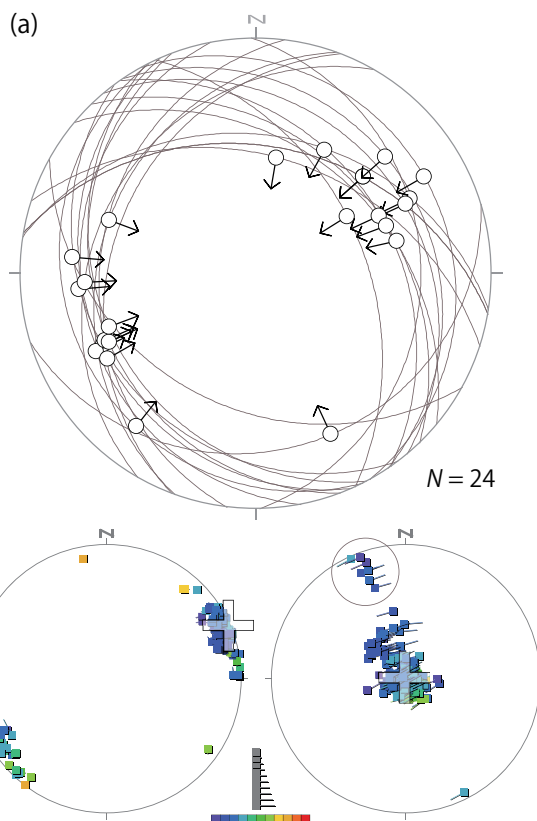


図 28 均一に近いデータ (a) と、それを多重逆解法で処理した結果 (b)。前者は下半球等角投影。十字は、オタマジャクシ記号が示す全応力状態を平均した応力状態の主軸方向。

でいる場合、均一に近いデータが得られるわけです。

7.1 均一データ

均一または均一に近い断層スリップデータの場合にどうするか、24条の低角逆断層のみで構成されるデータセットを使って説明します(図 28a)。これは、宮崎層群から得られた天然のデータです[56]。断層面とスリップ方向をみると、断層擦痕を示す丸印が第1象限にあるものと他のものとが共役関係にあるように見えます。しかし、丸印が南南東にある ENE-WSW 走向の断層は、方向からみて明らかに例外ですし、そもそも断層面の方向にもスリップ方向にもバリエーションがあるので、均一であるとしても、上述のような何らかのノイズないし応力のゆらぎを示唆しています。このデータセットを多重逆解法で処理した結果が図 28b です。データが完全に均一ではないために、紺色~黄緑のオタマジャクシ印が半径 30° 程度の範囲でばらついています。これは元データがどのくらい不均一か、その程度を表しています[61]。データのノイズレベルと言うこともできます。これとは

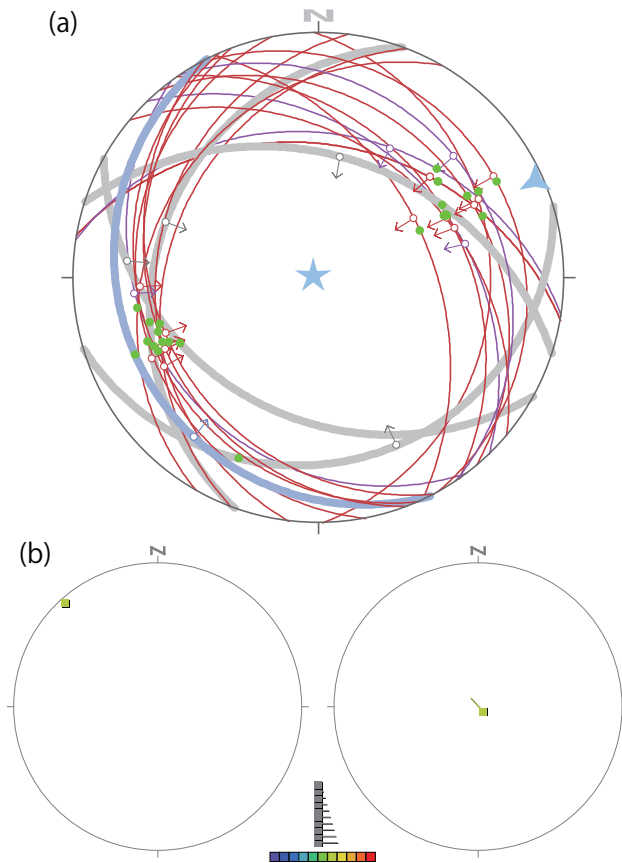


図 29 (a) 最適応力のもとでのミスフィット角が、 10° 、 20° 、 30° 未満の断層スリップデータをそれぞれ赤、紫、青で示す。それが 30° 以上のものは、灰色で示されている。また、 20° 以上の断層面を太線にした。(b) ミスフィット角が 20° を超える 5 条分のデータにとっての最適解。

違うデータセットを使った結果ですが、いろいろなノイズレベルの場合の多重逆解法の結果を、図 42 に示します。また、均一データのノイズレベルと平均応力角距離のあいだの経験則について、付録 D.4 で解説しています。

メインメニューの Measurement から Global Average and Spread を選ぶと (p. 13) ,Result of Measurement ウィンドウに、オタマジャクシ記号が示している全応力状態達を平均した応力状態が表示されます (図 16) 。この場合、図 28b の十字がその主軸方向であり、応力比は 0.26 と算出されました。この平均が、与えられた均一に近いデータにとって、最適解です。この最適応力による各断層のミスフィット角をみてみましょう。ミスフィット角が 20° 以上の断層は、図 29 で面の方向を示す大円を太線にしてあります。予想通り、SE 象限に擦痕のある断層は、ミスフィット角が 47° もあり、この最適応力では説

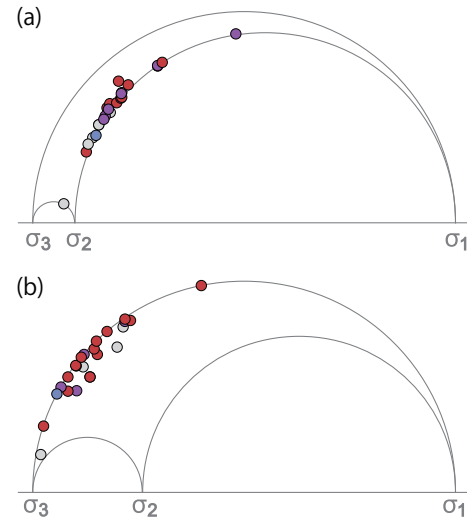


図 30 (a) 図 28b において丸で囲った青いオタマジャクシ記号のクラスターが表す応力状態で描いた Mohr ダイアグラム。(b) 図 28b において十字で示された最適応力で描いた Mohr ダイアグラム。

明できない断層です。また、説明できるできないの境界のミスフィット角を 20° に設定すると、上記のものを含め、説明できない断層が 5 条あることがわかります。この 5 条分のデータが上記の最適解とは違った、2 番目に重要な応力を示すか、それとも単なるノイズであるかは、ここに提示されたデータだけでは決まりません。他の地学的情報とあわせて判断すべきことです。

図 28b には、丸で囲んだ青いオタマジャクシ記号のクラスターは、2 番目に重要な応力を示しているようにも見えます。その当否をみるために、この応力と上述の最適応力とで、Mohr ダイアグラムを書いてみると、図 30 のようになります。丸で囲んだ方を応力 B、最適解のほうを応力 A としましょう。応力 A を仮定して描いた Mohr ダイアグラムは、データ点が外側の Mohr 円 (σ_3 と σ_1 が直径の両端である円) にほぼ沿って、しかもその円弧の左上部分にほぼ沿ってデータ点が並んでいます (図 30b) 。これは摩擦すべりをした断層として、自然です。これとは反対に、応力 B を仮定して描いた Mohr ダイアグラム (図 30a) では、データ点が内側の Mohr 円 (σ_2 と σ_1 が直径の両端である円) にほぼ沿って並んでおり、摩擦すべりをした断層達にしては不自然です。ある法線応力で許される剪断応力のうち最小の剪断応力で断層が動いたことになるからです。このことは、この応力の σ_3 軸が多く断層面と平行に近いことに起因します (図 28) 。この

応力にとって、24 条の断層達は、不都合な方向を向いているということです。したがって、図 28b で丸で囲んだ青のオタマジャクシ記号達は、最適解とは独立な応力を示すのではなく、最適解を表すガードル状クラスターの一部と考えたほうが自然であるといえます^{*13}。

7.2 不均一データ

次に、不均一データにどうすればよいか説明します。不均一な断層スリップデータからいくつもの応力が検出されたとして、どれが有意でどれがそうでないのか、迷うことがあります。天然のデータはノイズや応力状態自体の揺らぎが必ずあるので、天然データを扱うほとんどの場合、そうした迷いを感じるはずで

それを考える鍵が、ミスフィット角です。それにより、どの断層がどの応力状態で動かされ可能性が高いかがわかるので、応力ごとに断層を分類することができるからです。地質断層の場合、断層間の切断関係がよくわかっていると、断層と応力との対応関係とあわせて、応力状態の変遷がわかるでしょう。

ただし、ミスフィット角には、注意しなければならぬ点があります。想定した応力状態の主応力軸と、問題とする断層面とが、平行または直交に近くなると、ミスフィット角は不安定な挙動を示します。すなわち、主応力軸の方向またはダンス面の方向がすこし変わるだけで、ミスフィット角は大きく変化してしまうということです。断層面の方向にしろ主応力軸にしろ、誤差や不確実性はつきものなので、この不安定性は、ミスフィット角の信頼性が、そのような場合には低いことを意味します。そのような状況になっているかどうかは、図 21 のように tangent-lineation diagram を表示することにより、チェックすることができます。

断層面が主応力軸と平行に近いまたは直交に近い状況では、その応力状態のもとでは、その断層は動きにくいので、その断層がその応力状態に対応づけられる可能性は低いと考えることができます。易動度 (slip tendency) [25] の大小です。すなわち、そうした状況では、断層面における剪断応力が小さいので、その応力状態ではそれらの断層は動き難いということです。ただし、断層面の摩擦係数は断層ごとに、あるいは時代によって変化する

^{*13} 詳しく言うと、これは、応力テンソルインバージョンの基本的前提から逸脱した判断です。というのも、このインバージョンの基本原則は Wallace-Bott 仮説であるが、同仮説は剪断応力の大きさには言及していないということです。なぜ言及しないかというと、ある応力状態にとっていかに不都合な方向の断層でも、間隙圧が大きければ動き得るからです。

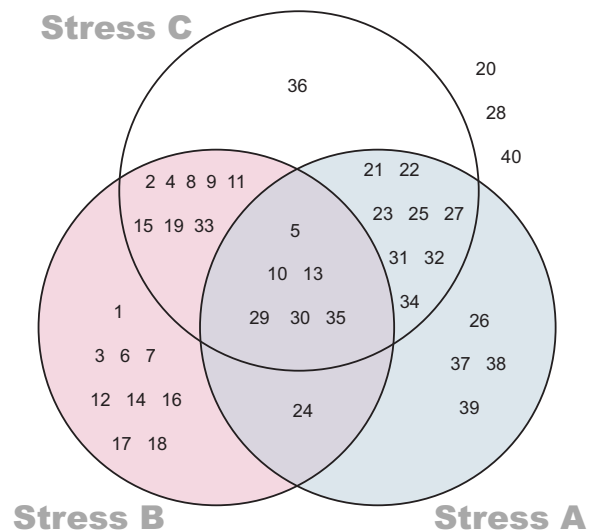


図 31 第 1 番から 40 番までの断層スリップデータが、応力状態 A, B, C のどれで説明できるかを示すベン図。

でしょうから、この動きにくさは絶対的なものではありません。易動度が小さくとも、摩擦係数の小さな、あるいは間隙水圧の大きな断層は動けるからです。したがって、易動度に関するこの条件は、絶対的なものとはいえません。

また、そもそも、どの断層がどの応力で動かされたか、この判断にはファジィな面があります。ミスフィット角の算出には Wallace-Bott 仮説を使いますが (付録 C.1)、同仮説を認めるなら断層と応力との対応関係は曖昧であることを認めざるを得ないのです。相異なる複数の応力状態が、断層を同じ方向にスリップさせることができるからです。こうした曖昧さを認めた上で、断層の分類を次のように考えることができます。

7.2.1 最初の例

具体的な例で説明します。断層 40 条からの不均一データから、多重逆解法により、3 つの応力状態 A, B, C が検出されたとして、どの断層がどの応力で動かされた可能性が高いか調べ、最終的に応力状態 C は有意ではないと結論づける例です。断層は 1~40 の番号で識別します。

そこで、ある敷居値、例えば 20° を設定し、ミスフィット角がこれより小さい断層スリップデータは、仮定した応力状態で説明できるとします。その場合、その断層はその応力状態で動かされた可能性が高いわけです。ミスフィット角がこの敷居値より大きければ、説明できないということにします。図 31 は、1 番から 40 番までの断層が応力状態 A, B, C のどれで説明できるかを示してい

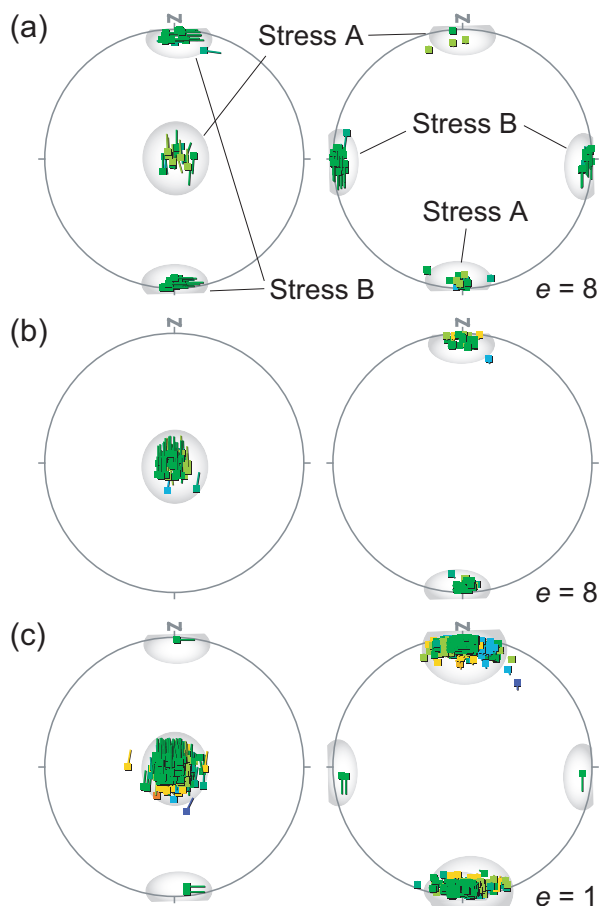


図 32 応力状態 A および B を記録している不均一断層スリップデータを多重逆解法で処理した結果。(a) 応力状態 A と B で動かされた断層の数が、それぞれ 30 条の場合。(b) それぞれ 30 条と 10 条の場合。(c) 断層数は (b) と同じだが、enhance factor (e) の値が違う。

ます。例えば第 1 番のデータは、応力状態 A によるのみ説明されるのに対して、第 24 番のデータは応力状態 A によっても応力状態 B によっても説明できるわけです。また、第 20, 28, 40 番の 3 つは、どの応力状態でも説明できません。

まず注目すべきは、応力状態 C によるのみ説明できるのは、第 36 番のデータのみということです。このことから応力状態 C は、他の 2 つの応力状態に比べて重要度が低いといえます。わずかひとつのデータのために第 3 の応力状態を想定するのは有意ではないとして、これを無視することができます。

応力状態 A または B で説明できるデータに注目して、どの断層がどちらの応力状態で動かされたかという判断に進みます。図 31 の色付きの領域だけを考えるわけです。水色の領域に番号が書かれた断層は、応力状態 A で

表 2 応力状態 A および B (図 32) のもとでの、40 条の断層のミスフィット角。この角が 20° 未満のものを茶色の背景で示す

	A	B		A	B
1	0.0	171.3	21	0.1	151.7
2	0.0	157.5	22	0.0	142.0
3	0.1	62.6	23	0.1	7.5
4	0.1	112.7	24	0.0	127.8
5	0.1	126.0	25	0.0	138.3
6	0.1	3.2	26	0.1	152.2
7	0.0	105.8	27	0.0	139.7
8	0.0	146.9	28	0.1	146.9
9	0.0	146.5	29	0.1	143.9
10	0.1	115.2	30	0.1	178.4
11	0.0	36.1	31	171.3	0.1
12	0.1	89.2	32	152.4	0.0
13	0.0	135.4	33	31.3	0.1
14	0.0	158.6	34	134.1	0.1
15	0.0	117.1	35	123.0	0.1
16	0.0	61.2	36	11.0	0.1
17	0.1	86.6	37	142.6	0.1
18	0.1	135.4	38	144.2	0.2
19	0.0	141.1	39	174.3	0.0
20	0.2	143.5	40	138.5	0.1

動かされた可能性が高く、ピンクの領域のそれは、応力状態 B で動かされた可能性が高いといえます。それに対して、紫色の領域のものは、それら 2 つの応力状態のいずれかで動かされた可能性が高いが、どちらであるかミスフィット角では判断できないデータを表します。ミスフィット角による判別は、このような曖昧さを伴います。

7.2.2 二番目の例

次に、応力状態 A と B を記録している不均一データからそれらの応力状態を分離する場合は考えます。応力状態 A で動かされた断層数 N_A と、応力状態 B で動かされた断層数 N_B として、 $N_A \approx N_B$ なら 2 つの応力状態を分離するのはたやすいが、 N_A と N_B の差が広がると、断層数の多い応力状態を認定できても他方がつかまえないのは当然です。そうした場合は、どうするかというのが、ここでの問題設定です。

応力比が 0.5 の、2 つの応力状態 A と B を、図 32(a) に示します。前者は鉛直圧縮・南北伸張の正断層型、後者は南北圧縮・東西伸張の横ずれ断層型です^{*14}。 $N_A = N_B = 30$ の場合の多重逆解法の結果が図 32(a) で、2 つの

*14 鉛直に近い σ_1 軸と水平に近い σ_3 軸をもつのが正断層型の応力(状態)、それらの主応力軸がともに水平に近いのが横ずれ断層型の応力(状態)です。また、鉛直に近い σ_3 軸と水平に近い σ_1 軸をもつのが逆断層型の応力(状態)です。

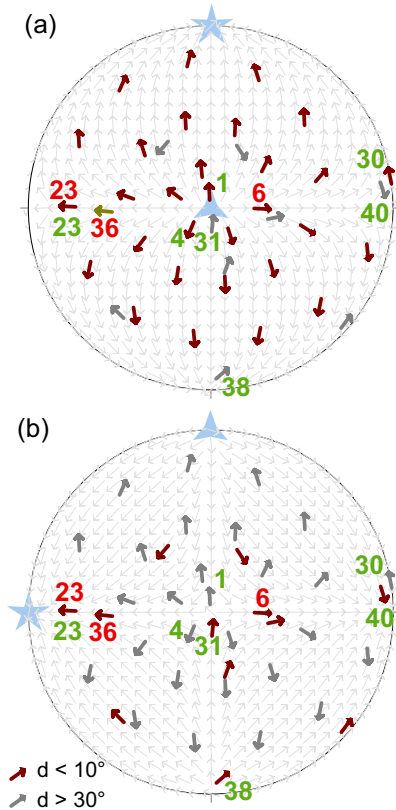


図 33 (a) と (b) は、それぞれ応力状態 A および B (図 32) のもとでの、40 条の断層のスリップ方向を示す tangent-lineation diagram. 赤と緑の数字は、表 2 のデータ番号. 赤字は、2 つの応力状態のもとで、ほとんど同じ方向にすべる断層を示す. 緑字は、断層面の法線が主応力軸の 1 本と 20° 以下で交わる断層を示す.

応力状態は同じ程度の数のオタマジャクシ記号からなるクラスターをなして、明瞭に分離・検出されています.

同じ 2 つの応力状態でありながら、 $N_A = 30$, $N_B = 10$ の場合の結果を示すのが図 32(b) です. 強調ファクター (e) がデフォルトの値である 8 では、応力状態 B が現れておりません. この値を下げると、それに対応したオタマジャクシ記号が見えてきます (図 32(c)). しかしながら、応力状態 B を示すクラスターはあいかわらず疎であり、有意かどうか、このプロットだけでは不明確です. むしろ否定的に見えます. そこで、ミスフィット角のリストをみてみます.

$N_A = 30$ と $N_B = 10$ をあわせた 40 条の断層から多重逆解法によって、図 32(c) のように応力状態 A が明確なクラスターとして認定され、B のほうは有意性の不明確な応力状態として捉えられたとしましょう. もちろん、この人工データを生成したときの $N_A = 30$ および

$N_B = 10$ という値を、データ解析者は知らないものとします. それらの応力状態による各断層のミスフィット角を示したのが表 2 です. 茶色の欄は、断層スリップデータが応力状態 A ないし B と適合することを示します. このリストから、第 36 番を除いて応力状態 A では第 30 番 ~ 第 40 までのデータが説明できないことがわかります. つまり全部で 40 条の断層のうち 10 条という無視しにくい数のデータが応力状態 B なしには説明できないことがわかったわけです. こうして応力状態 A のみならず、応力状態 B もこのデータセットを説明するには必要であると判定できるわけです.

このリストで第 6, 23, 26 番は、2 つの応力状態の両方に適合します. それら 3 条分のデータがない場合には、対応付けは完璧です. これは図 33 に示されるように、どちらの応力状態でもそれらの断層がほとんど同じ方向に動くことに起因します. この図で緑色の数字で示された断層は、主応力軸にほぼ直交する断層面をもっています. したがって、それらのミスフィット角は、それ自体、大きな誤差を含んでいることを示しています. これらは、ミスフィット角のみによる断層スリップデータと応力状態との対応付けにはファジーであることが、ときに不可避であることを示しています.

Appendices

付録 A 用語集

基本的言葉について、本文中でも説明していますが、まとめて簡単に解説します.

応力状態 主応力軸の方向と応力比の両方を共有する応力達をまとめて、ひとつの応力状態とよぶ^{*15}. ひとつの応力状態は、特定の主軸方向と応力比の特定の値によって規定される.

応力角距離 二つの応力状態がどのくらい違うかを示す量で、 Θ という記号で表す. 同一なら、最小値 $\Theta = 0^\circ$

*15 応力状態という言葉がこのように意味を狭めて定義するのは、一般的ではありません. この語は、普通、もっと漠然とした意味に使われています. 応力インバージョンでは普通、絶対値が決まらないので、このように定義すると解を表すのに便利なわけです.

をとる．どんな断層も逆方向に動かすという意味で正反対の応力状態なら，最大値 $\Theta = 180^\circ$ となる．

応力の型 3本の主応力軸のどれが鉛直に近いかで，応力状態が3つに分けられます．正断層型・逆断層型・横ずれ断層型の応力は，それぞれ σ_1 軸， σ_3 軸， σ_2 軸が鉛直に近いことを示します．

センス 断層のスリップセンスまたは変位センスというときのセンスは，正断層・逆断層・右ずれ・左ずれの違いを表します．

多重逆解法 不均一な断層スリップデータまたは不均一な発震機構データから，複数の応力状態を検出するための方法．均一データが与えられれば，正しい答えをひとつ算出する．

均一データ 時間的 and/or 空間的に一様な応力状態のもとで発生した，断層活動の結果を記録しているデータ．このデータからは，その応力状態が検出されることが期待される．

不均一データ 時間的 and/or 空間的に一様でない応力状態のもとで発生した，断層活動の結果を記録しているデータ．このデータからは，応力状態の不均一性が解明されることが期待される．

ミスフィット角 ある応力状態を仮定して Wallace-Bott 仮説を使って計算したの断層のすべるべき方向と，実際に観察されたその断層のすべった方向とが何度ずれているかを示す量．

説明できる，適合する ある応力状態で断層スリップデータが説明できる，という表現があります．また，断層スリップデータがある応力状態に適合するとか，ある応力状態が断層スリップデータに適合すると言うことがあきます．これらは，その応力状態によるミスフィット角が十分に小さいことを意味します．そう判断するためのミスフィット角の閾値として， $15 \sim 30^\circ$ の範囲の値がよく使われます．

付録 B 断層スリップデータをステレオネットにプロットする2つの方法

断層スリップデータをステレオネットにプロットするには，2つの方法があります．図34に例を示します．

図34aの図法では，断層面が大円で示され，断層擦痕の方向がそのうえの丸印で表されます．そして，スリップセンスが，この丸印に添えられた矢印で表現されてい

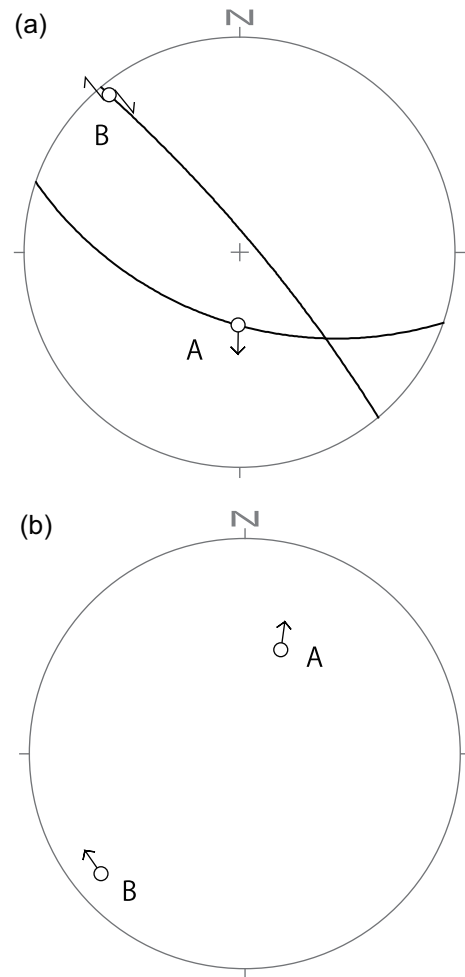


図34 ステレオネットで断層スリップデータを表現する2つの方法．(a)と(b)で，同一のデータを表す．下半球等角投影．

ます．正断層の場合は，基円^{*16}の中心から基円の外に向かって，小さな矢印が描かれます．したがって，図34aの断層Aは，正断層です．逆断層なら，丸印から貴園の中心に向けて矢印が描かれます．

横ずれ成分が大きい(擦痕が水平に近い)場合は，右横ずれまたは左横ずれ断層です．それらの場合，図34aの断層Bのように丸印に逆向きの矢印を2つ添え，左右のセンスの違いを表します．この図の例のように，2つの矢印が時計回りになっているなら右ずれ，反時計回りなら左ずれです．

この図法は実際の断層スリップデータを素直に表現していて，直感的につかみやすいのですが，理論的考察には不向きな面があります．その面では，tangent-lineation

*16 ステレオネットの外側の円，すなわち，プランジが 0° で方位角が 0° から 360° 変化させてできる円のこと．

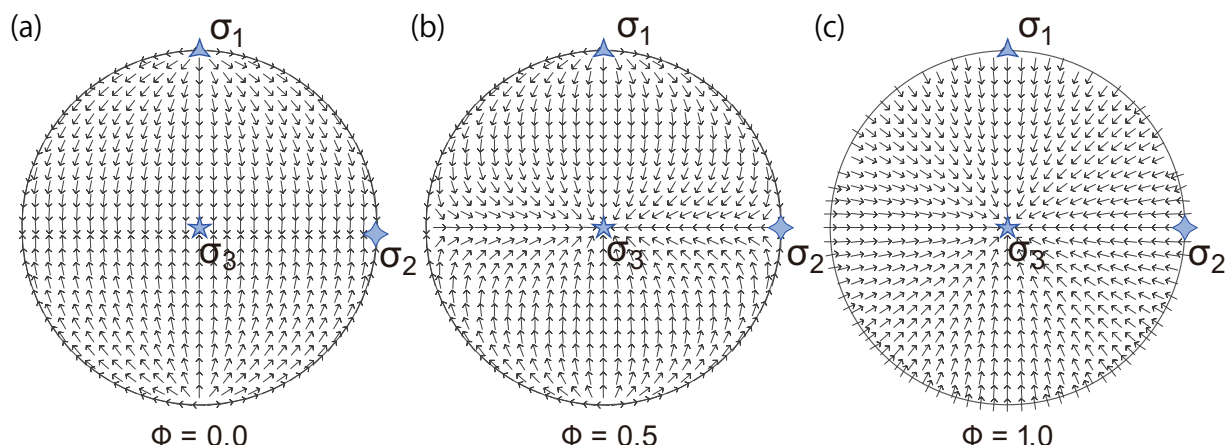


図 35 理論スリップ方向を表す tangent-lineation diagram . 3 つのプロットは、主軸方向が同一だが、応力比が異なる 3 つの応力状態によるスリップ方向の違いを示す .

diagram と呼ばれる図 34b の図法が便利です . その場合、1 つのデータは小さな矢印 1 つで表現されます . 矢印の始点は、断層面の極の方向を表します . そして、上盤からみた下盤の運動方向を矢印で表します [52, p. 235] . 図 34b では、矢印の始点に丸印がプロットされてます . この図の断層 A のように、矢印が基円の外側に向いているなら正断層であり、基円の中心に向かうなら逆断層です . 断層 B のように横ずれ断層では、矢印は基円の最近接点の接線とほぼ並行になり、矢印が時計回りの向きなら右ずれ、反時計回りの向きなら左ずれ断層であることがわかります .

理論的考察には tangent-lineation diagram のほうが便利であることは、図 35 が明瞭に表しています . この図の矢印達は、図中に示された応力により、どんな断層運動が起こるかが示されています . 矢印達がつくるパターンを水の流れにたとえると、 σ_1 方向から湧き出し、 σ_3 方向に吸い込まれてゆく流れパターンになっています . そして、 σ_2 方向は、収束する矢印と発散する矢印が隣り合っている鞍点になっています .

このパターンは、図 38 に示すような、応力楕円体の対称性を反映しています . 例えば、 $\Phi = 0$ の場合、2 つの主応力 σ_2 と σ_3 が等しいので σ_1 軸の周りに軸対称の応力状態です . したがって、tangent-lineation diagram は、 σ_1 方向から湧き出して σ_2 軸と σ_3 軸で規定される平面 ($\sigma_2\sigma_3$ 主応力面) で収束する軸対称の矢印パターンになります (図 35a) . 応力比が 0 と 1 の中間の値なら三軸応力で、矢印パターンは直交対称性 (orthorhombic symmetry) を示します (図 35b) . $\Phi = 1$ では σ_3 方向にむかって収束

する軸対称のパターンです (図 35c) .

この図法はこうした性格を持つので、均一な断層スリップデータを tangent-lineation diagram で表すと、発散する方向と収束する方向として、 σ_1 方向と σ_3 方向がわかります . 均一データから応力を推定する問題は、データの tangent-lineation diagram に図 35 のようなパターンをフィッティングする問題と等価であるということです .

付録 C 理論

多重逆解法の基本原理は、2000 年の文献 [51] のとおりです . しかし現在の多重逆解法は、Sato and Yamaji [36] が再構成したパラメータ空間を利用することにより、高度化をとげています . まず、計算グリッドを完全に作り替え [37]、アルゴリズムにも変更が加えられました [30] . さらにメインプロセッサがバージョン 6 になり、発震機構を処理するアルゴリズム [32] が加わりました .

本ソフトウェアを駆使しようとするユーザーのために、理論について、概略を説明します . 詳しくは引用文献をご覧ください .

なお、本ソフトウェアでは、図 36 の座標系を使用します . MI Viewer には、オタマジャクシ記号の表す応力成分をファイルに書き出す機能がありますが、応力成分の意味を考えると、この図が役立つでしょう .

C.1 Wallace-Bott 仮説

多重逆解法は、小断層解析の古典的逆解法を拡張した数値解法であり、Wallace-Bott 仮説によって、応力と断層スリップとを結びつけています [5, 47]. すなわち、断

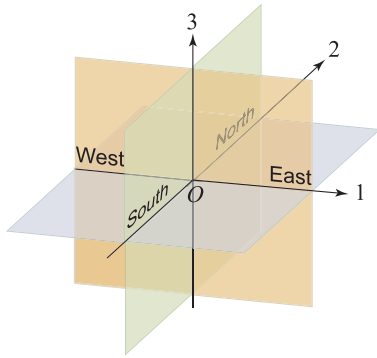


図 36 多重逆解法で使う直交デカルト座標。

層面に作用する剪断応力の方向に断層が動く，と考えるわけです。このことを式で表すと，単位ベクトル n を法線とする断層面上に応力 σ が作用すると，この面はトラクション $t = \sigma n$ を受けます。法線応力と剪断応力は，それぞれ

$$\sigma_N = t \cdot n \quad (4)$$

$$\sigma_S = |t - \sigma_N n| \quad (5)$$

です。Mohr ダイアグラム表示ウィンドウ (図 22) にプロットされるのは，これらを差応力 $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ で規格化したものです。この規格化の結果，法線応力と剪断応力は，それぞれ $[0,1]$ と $[0,1/2]$ の範囲の値をとります。後者が負の値をとらないのは，Mohr ダイアグラムを描く場面で，剪断センスを問題にしないからです。

さて，剪断応力のほうは，ベクトル量として

$$s = t - (n \cdot t)n. \quad (6)$$

と書けます。この剪断応力を緩和する方向に断層が動くので (図 37)，断層スリップは $-s$ の方向に起こります。これが，Wallace-Bott 仮説です [54]。したがって，応力テンソル σ を仮定すると， n を法線とする断層のすべるべき方向，すなわち，理論すべり方向が式 (6) で計算できるわけです。これを，

$$s^{(\text{theory})} = -s/|s| \quad (7)$$

という単位ベクトルで表すことにします。そして，観察された実際のスリップ方向を単位ベクトル $s^{(\text{obs})}$ で表すことにすると，ミスフィット角は，式

$$d = \cos^{-1} [s^{(\text{theory})} \cdot s^{(\text{obs})}]$$

で計算できます。

なお，式 (7) は， $s = 0$ のとき不定になります。これは，断層面が 3 本の主応力軸のいずれかと直交するときにおこります。このことのために，図 35 の tangent-lineation diagram の矢印達のつくるパターンには，主応力軸の方向に 3 つの特異点が現れるわけです。

C.2 応力状態

われわれは，主応力軸と応力比 Φ の値を共有する一群の応力をすべて同一視し，ひとつの応力状態 (state of stress or stress state) にあるものと見なします。主応力軸と応力比 Φ の値を共有する応力は，無限にたくさんあります。例えば， σ_1 軸が東西で， σ_3 軸が南北で， $\Phi = 0.5$ という場合を考えましょう。この条件に合う主応力の値は，例えば $\sigma_3 = 1$ MPa, $\sigma_2 = 2$ MPa, $\sigma_1 = 3$ MPa です。応力比の定義式 (1) から明らかなように， $\Phi = 0.5$ ということは，中間主応力の値が σ_1 の値と σ_3 の値のちょうど中間であるということなので，例えば 3 つの主応力がそれぞれ 30 MPa, 35 MPa, 40 MPa でも同じ応力状態になります。絶対値の組合せは無限にたくさんあることになります。注意しなければならないのは，ひとつの応力状態に対して，主応力軸の方向は一通りしかないということです。任意性があるのは，主応力の絶対値の組合せです。

応力比 Φ は，幾何学的に解釈することができます。主応力軸は互いに直交します。そこで主応力軸と平行な主軸をもつ楕円体を考え，その 3 つの主半径を 3 つの主応力の値と一致させれば，楕円体の姿勢で主応力軸の方向を，主半径で主応力の大きさを表現することができます。これを応力楕円体 (stress ellipsoid) とよびます。 Φ はこの楕円体の形状を表しているのです。そのため，shape factor とよばれることもあります。 $\Phi = 0$ なら

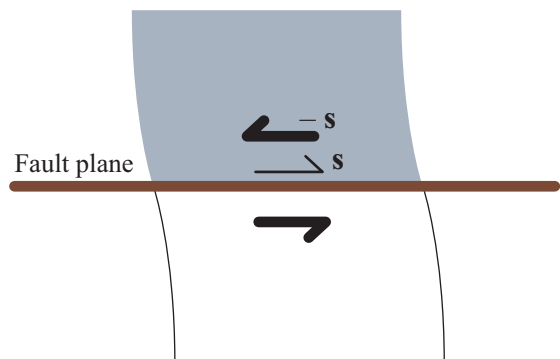


図 37 上盤に働く剪断応力の方向 (細線の矢印) と断層変位の方向 (太線の矢印)。

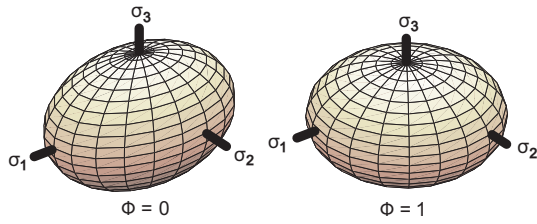


図 38 応力比 Φ の違いによる応力楕円体の形状の違い。ある応力が与えられたとき、それに対応する応力楕円体は、主応力軸と平行な主軸を持ち、主半径の長さが主応力軸の値と等しい。 $\Phi = 0$ なら $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ なので、 σ_1 軸に関して軸対称。 $\Phi = 1$ なら $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ なので、 σ_3 軸に関して軸対称となる。 $0 < \Phi < 1$ では、三軸楕円体 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)。歪み楕円体との違いには注意すること。例えば $\Phi = 0$ の応力を均一で等方的な物体におよぼすと、結果として生じる歪み楕円体は σ_1 軸に関して軸対称のパンケーキ型になる。

$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ なので応力楕円体はハマキ型、 $\Phi = 1$ なら $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ なのでパンケーキ型です。上記の意味で主応力の絶対値の組合せに任意性があったということは、応力楕円体の姿勢と形状は決まっているが、サイズに任意性があるということなのです。

応力状態という語をこのように定義する理由は、それら一群の応力が、Wallace-Bott 仮説によると、同じ方向に断層をすべらせるからです。断層のすべり方向だけで識別できるのは、異なる応力状態であって、3つの主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ それぞれの絶対値が分かるわけではないということです。

応力は一般に、テンソルで表現されます。3次元なので、 3×3 の対称行列で表現できるということです。そこで、主応力軸の方向と Φ の値を組にした情報のみにない、主応力の絶対値の情報を捨象したテンソルを考えることにします。これを、規格化応力テンソル (normalized stress tensor) または換算応力テンソル (reduced stress tensor) とよびます。

規格化条件は研究者により、また目的により異なります。初期の文献 [2, 3] には数種類の規格化応力テンソルが示されていますが、どれを使うべきか、当時、理論的な優劣は理解されていませんでした。われわれは現在、明確な理由があって、

$$\sigma = \frac{1}{\Lambda} R^T \begin{pmatrix} 2-\Phi & 0 & 0 \\ 0 & 2\Phi-1 & 0 \\ 0 & 0 & -\Phi-1 \end{pmatrix} R \quad (8)$$

という規格化応力テンソルを使います。ただし、 $\Lambda =$

$\sqrt{3\Phi^2 - 3\Phi + 3}$ であり、 R は主応力軸の方向をあらわす直交テンソルです。式 (8) の右辺の行列は、応力楕円体 (図 38) の形状に関する情報をにない、 R が方向の情報をにうわけです。このかたちの応力テンソルを使うと、応力テンソルインバージョンが、幾何の問題に帰着でき、また誤差評価が容易になるなど、さまざまなメリットがあります [36, 61]。そのために、このかたちの規格化テンソルを使うわけです。

式 (8) のテンソルは、平均応力がゼロで第 2 主不変量が 1 という 2 つの規格化条件を満たします。すなわち 3 つの主応力が、2 式

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0 \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) = 1 \quad (10)$$

を満たすということです*17。第 2 主不変量というのは、定性的には、異方性の強度にあたる量です [52, p. 74] 逆にいうと、それらを満たすように、規格化応力テンソルを定義すると、式 (8) のかたちになるということです*18。

応力の絶対値が決まらないということには、長短両面があります [54]。断層活動を支配するのは主応力の絶対値ではなく、それから間隙流体圧の分を除いた有効応力です。しかるに有効応力の変化は、主軸方向にも応力比にも影響を与えません。したがって、異なる間隙水圧のもとで活動した一群の断層達のデータを使って応力を計算しようとするとき、間隙水圧の違いを気にとめる必要がないことが、長所といえます。地質学的過去の間隙流体圧は推定しにくい量ですし、現在の間隙流耐圧でさえ、震源域のそれはやはり推定しにくいから、それを気にせず済むのが長所であるということです。

また、地質断層の場合は、断層が動いたとき、その断層がどんな深さにあったか不明確ですが、規格化応力テ

*17 不変量を用いて規格化しているおかげで、本ソフトウェアの精度や分解能は、座標軸の方向の選び方に依存しません。また、精度や分解能が主応力軸の方向によらず一定です。不変量で規格化しない他の方法では、例えば南北圧縮は検出しやすいが東西圧縮はしにくい、というような、不均一性が生じます。

*18 ここで戸惑うかもしれないので、補足説明します。式 (8) のかたちの σ の最大主応力と最小主応力は、式 (9) のために、それぞれ正と負の値をとります。すると 3 つの主応力値を主半径とする楕円体などありえないと、戸惑うのではないかとということです。確かに、厳密にはここで示した応力楕円体の定義は不適当です。しかしこのように考えてください。すなわち、適当な大きさのゲタ a を覆かせて、 $\sigma_3 + a, \sigma_2 + a, \sigma_1 + a$ のすべてが正符号になるようにしたうえで、それらを楕円体の主半径とするという考え方です。3 つの主応力値がそのようにそろって変化しても、このあとの間隙流体圧の議論と同じ理由で、さいわい断層のスリップ方向には影響を与えません。

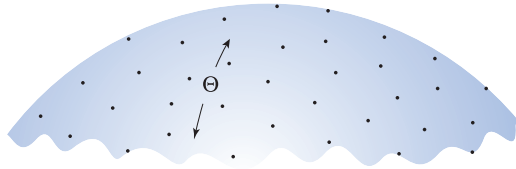


図 39 パラメータ空間の模式図．多重逆解法は，5次元空間の単位球の表面（この図の青色の面）をパラメータ空間として用いている [36]．その表面上の点は，規格化応力テンソルと 1 対 1 対応する．この球面上に 60000 個の点（この図の黒印）を均一に分布させ，計算グリッドとして用いている [37]．応力テンソルバージョンの解として得られる応力は，それらの点で代表される．

ンソルを議論する限りでは，主応力値が深度に比例する限り，その違いを無視できるのです．もっと緩い条件，すなわち深さに関して区分的に比例関係が成り立つ場合には，深度区間ごとに異なる応力状態ということになり，多重逆解法の出番となります．

C.3 パラメータ空間

異なる応力状態を異なる点で表せるような空間を定義しておく，幾何学的イメージを使って考えが進められて便利です．それをパラメータ空間とよぶことにします．

多重逆解法は 2005 年に，使用するパラメータ空間を最初の素朴なもの [51] から，Sato and Yamaji [36] のものに変更しました^{*19}．この新しいパラメータ空間について説明します．このパラメータ空間については，日本語の解説もあります [38]．

われわれが直面する問題では，解として得られる応力状態と，パラメータ空間の点が 1 対 1 対応することが重要です．Yamaji [51] による最初のパラメータ空間では，この対応関係が成り立っておりませんでした．このためにわれわれは，5次元空間の単位球（半径 1 の球面）をパラメータ空間として利用します（図 39）．この球面上の点の位置を，5次元の位置ベクトル x で表すことにします．すなわち，球の中心を始点とするベクトルの終点によって，この位置を表現するわけです．これと式 (8) のテン

^{*19} 多重逆解法を提唱したときに Yamaji [51] が用いた素朴なパラメータ空間とは，次のものでした．主応力軸の方向を， $\sigma_1\sigma_2$ 主応力面の走向傾斜とこの面上での σ_1 軸のレイクといった具合に，3つのオイラー角 θ, ϕ, ψ で表すことにします．そうしたうえで，4次元空間の直交デカルト座標 $O-\theta\phi\psi$ で張られる空間を，パラメータ空間としていました．ただし，多重逆解法が何をやっているか説明するには，このパラメータ空間がわかりやすいのですが，空間内の点と応力状態とが 1 対 1 対応しないなど，満足できるものではありませんでした．詳しくは [37] を参照．

ソルは，式

$$x = \begin{pmatrix} -\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{12}\right)\sigma_{11} + \left(\frac{\sqrt{2}}{4} - \frac{\sqrt{6}}{12}\right)\sigma_{22} + \frac{1}{\sqrt{6}}\sigma_{33} \\ \left(\frac{\sqrt{2}}{4} - \frac{\sqrt{6}}{12}\right)\sigma_{11} - \left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{12}\right)\sigma_{22} + \frac{1}{\sqrt{6}}\sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad (11)$$

および式 (9) を通じて 1 対 1 対応します^{*20}．そしてこの σ と応力状態が 1 対 1 対応するので，この x と応力状態もまた 1 対 1 対応するというわけです．式 (9) と (10) の条件を満たす σ であるかぎり， x は単位ベクトル，すなわち式 $|x| = 1$ が成り立ちます．

このパラメータ空間は球面なので，2 点間の距離として角距離 Θ を使うのが自然で．単位球の上の 2 点が 2 本の単位ベクトル $x^{(1)}$ と $x^{(2)}$ で表されているとすると，この 2 点間の角距離は

$$\Theta = \cos^{-1}(x^{(1)} \cdot x^{(2)}) \quad (12)$$

で計算できます． Θ は 5次元空間の距離という抽象的な量ですが，付録 C.4 で紹介するように，断層活動の統計的性質に対応する，という利便さがあります．

C.4 応力状態の差

応力状態が一樣か一樣でないかは，応力状態のあいだに違いがあるか否かという問いに帰着します．応力状態のあいだの差異の尺度あるいは距離は，厳密に定義することができます [61]．

2つの応力状態がどれだけ違うかを表すパラメータが，応力角距離 (angular stress distance) です [61]．これは，前節の式 (12) で定義された角距離 Θ です（図 39）．角距離なので，当然， 0° から 180° までの値をとります．2つの応力状態の間の Θ 値が 0° なら同一の応力状態で， 180° ならまったく逆の応力状態です^{*21}．まったく逆という意味は，どんな方向の断層面であれ，それら 2つの応力状態ですべる方向は， 180° の差があるという意味です．2

^{*20} テンソルのトレースは不変量なので，式 (9) は $\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} = 0$ と同値です．これと式 (11) により， x から σ への変換の線形変換式が出てきます．

^{*21} バージョン 4 以降の MI Viewer は，Sato and Yamaji [36] が定義したパラメータ空間を使っています．このパラメータ空間は，5次元空間の単位球であり，規格化応力はこの球面上の 1 点で表現されます．2つの応力状態が与えられると，この球面上に 2 点が生じられることとなります．この 2 点間の角距離が，応力角距離 Θ の幾何学的意味です．角距離ですから， 0° から 180° までの範囲にあることは当然であり，そのために角度の単位が付けられているわけです． $\Theta = 0^\circ$ なら 2 点は同一の点，すなわち同一の応力状態を表し， $\Theta = 180^\circ$ なら正反対の 2 点ということになります．

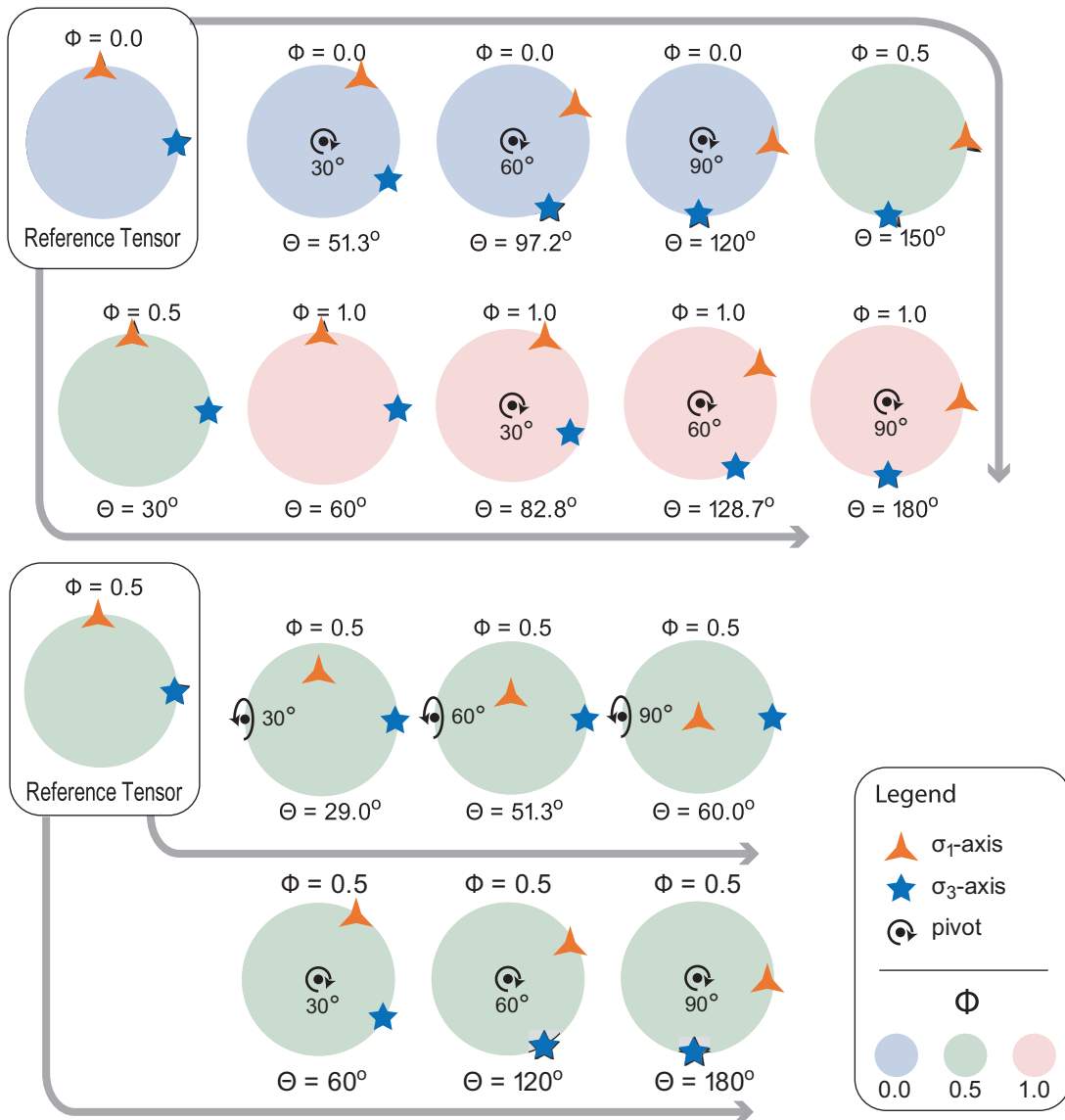


図 40 2つの基準応力状態から測った種々の応力状態までの応力角距離 Θ 。色のついたステレオネットで主応力軸の方向が表されている。その色は応力比を表す。

つの応力状態の間の Θ がそれらの中間の値の場合、それらの応力によるスリップ方向の差は、この Θ 値の間には、注目すべき関係があります。断層面の方向にもよりますが、あらゆる方向の断層面が存在する場合、このスリップ方向の差の平均は、 Θ で非常によく近似できるのです [61]。球面上で幾何学的に自然に定義されるということのほかに、これがこの応力角距離という量の長所であり、ほかでもなくこの量を利用する理由です。

応力状態の違いを表す量としてほかに、文献 [26] で定義された stress difference D があります (図 41)。これは、

[0, 2] の範囲の値をとり、

$$\frac{D}{2} = \sin \frac{\Theta}{2}$$

という式で応力角距離から換算できます。地震学では、Michael が定義したパラメータが使われることがあります [23]。これは $1 - \cos \Theta$ に等しく、[-1, 1] の範囲の値をとります [61]。

同じ「度」の単位をもっていますが、 Θ と実空間の回転角では、値が一致しないことに、注意が必要です (図 40)。わかりやすい例として、任意の応力楕円体をまず想定し、次にそれを中心を通る任意の軸のまわりに 180° 回転すること考えてください。もちろん結果はもとと同

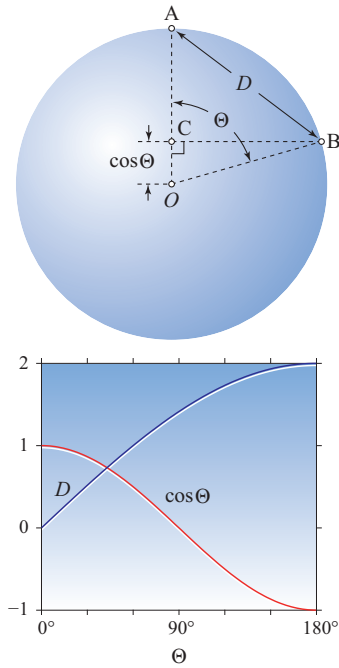


図 41 5次元空間の単位球上の2点A, Bのあいだの距離. D はユークリッド距離. Θ は角距離. 球の中心Oと点Aを通る直線に, 点Bからおろした垂線の足をCとする.

じ応力楕円体であり, 回転前後の楕円体の示す応力状態の間の距離は, $\Theta = 0$ です.ところがパラメータ空間で 180° へだてた2つの応力状態の間の主応力軸のなす角は, 180° ではありません.ほかの場合はどうでしょうか [61]. $\Phi = 0$ の応力状態は σ_1 軸のまわりに対称ですが, この軸と直交方向を回転軸として, この応力状態を 90° 回転して得られる応力状態は, もとの応力状態と 90° ではなく, $\Theta = 120^\circ$ 隔たっています. 応力比が0と1の応力状態が, 主応力軸の方向を共有するなら, それらの応力状態の間の Θ は, 60° です. $\Phi = 0.5$ の応力状態を, σ_2 軸のまわりに $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 回転して得られる応力状態は, もとの応力状態と $\Theta = 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ という距離にあります.

C.5 応力状態の平均とばらつき

メインプロセッサは, 与えられたデータから部分集合を生成し, ふるい分けを行い, 上記のような投票までを行います.そしてポストプロセッサが, 格子点ごとの得票数を可視化しているのです (§5.3.4). クラスターの認定は, このソフトウェアパッケージでは, §7のようにして, ポストプロセッサの画面上で対話的に判断していただくことになっています.

ポストプロセッサは, 表示されたオタマジャクシ記号が表す応力状態達の, 平均とばらつき (spread) を計算する機能を持っています (図 16). この平均は, それらの応力状態を後述の意味で代表する応力状態のことで, ポストプロセッサはその主応力軸の方向と応力比を表示します (図 16). これら統計量の詳細は, 文献 [61] に説明があります.

まず平均は, 次のようにして計算されます. 応力状態の数が N_p とすると, パラメータ空間においてそれらは N_p 個の点として表現されています. それらの点の重心の位置が表す応力状態が, 与えられた応力状態達の平均です. つまり m 番目の応力状態を表す点を $x^{(m)}$ とすると,

$$\bar{x} = \frac{x^{(1)} + \dots + x^{(N_p)}}{|x^{(1)} + \dots + x^{(N_p)}|}$$

によってこの重心が求まります. これに対応した応力状態が, 平均的な応力状態になります. 図 16 のダイアログ・ボックスには, この平均的応力状態の主軸方向と応力比が示されています.

次に, 応力状態達の広がり (spread) です. こうして得られた平均的応力状態と与えられた第 m 番目の応力状態の間の応力角距離を $\Theta^{(m)}$ とします. すなわち $\arccos[x^{(m)} \cdot \bar{x}]$ のことです. そして平均応力角距離 (mean angular stress distance) は, 式

$$\bar{\Theta} = \frac{1}{N_p} [\Theta^{(1)} + \dots + \Theta^{(N_p)}] \quad (13)$$

によって定義されます [61]. $\bar{\Theta}$ は 0° から 90° までの値をとり, $\bar{\Theta} = 0^\circ$ なら N_p 個すべてが同一の応力状態で, 上限の $\bar{\Theta} = 90^\circ$ では N_p 個がまったくばらばらの状態であることを示します. ポストプロセッサで, オタマジャクシ記号達が近似した色でまとまったクラスターをなしているほど, $\bar{\Theta}$ の値が小さくなります. オタマジャクシ記号のばらつき具合と平均応力角距離の関係を示したのが, 図 42 です. 一組の数値実験の結果であって, 実験の設定によっては違った結果にはなりますが, この図は目安として使えるでしょう.

平均 stress difference も同様にして定義されます. すなわち, 与えられた m 番目の応力状態と, 平均的応力状態との間の stress difference を $D^{(m)}$ とします. すると,

$$\bar{D} = \frac{1}{N_p} [D^{(1)} + \dots + D^{(N_p)}]$$

が平均 stress difference です. 図 16 のダイアログ・ボックスで mean stress difference と書かれた量です. これは

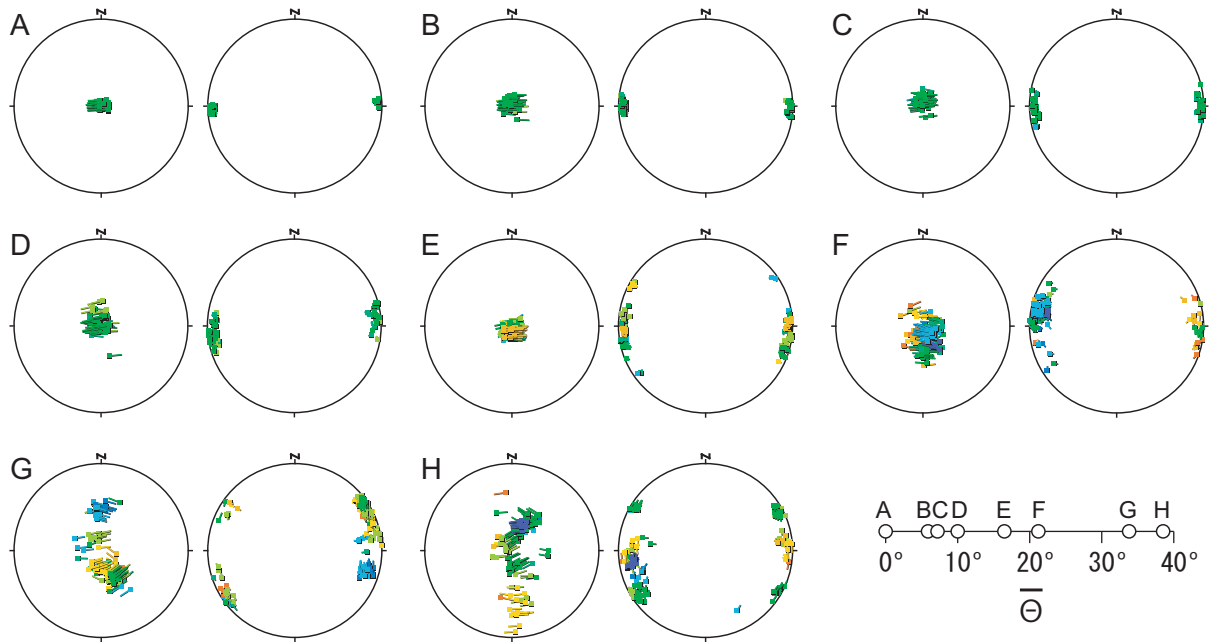


図 42 平均応力角距離 $\bar{\Theta}$ とオタマジャクシ記号のばらつき具合との対応．均一データにノイズを加えて A~H の人工データセットを作り，多重逆解法で処理した $k=5, e=8$ ．ノイズレベルは $\bar{\Theta}$ の値で示され，A はゼロ，H は 38° ．ノイズレベルの増大とともに，クラスターがばらけ，雑色になることがわかる．

0 から 1 までの値をとり， N_p 個すべての応力状態がすべて同一なら， $\bar{D}=0$ ，ばらばらなら $\bar{D}=1$ です．

ばらつきがない場合が $\bar{\Theta} = \bar{D} = 0$ ですが，本ソフトウェアパッケージでこれらの値が算出されることは，非常にまれです．というのも，計算結果を離散的な計算格子点で表現しているからです．このことについては，付録 D.4 でふたたび取り上げます．

小断層解析に古地磁気学の褶曲テストの技法を取り込むことができ，それによって大きく傾いた岩体中で小断層解析ができることを [63] が示しました．その際用いたのは \bar{D} でした．この目的には，その後提案された $\bar{\Theta}$ を使うことができますし，上記のように誤差やデータのノイズレベルなど，断層スリップデータの性質との対応が直接的である分， \bar{D} よりも使い易いといえます．

C.6 古典的逆解法

各断層について，断層面の方向と実際にすべった方向とが既知なので，データにとって最適な応力状態が，最小自乗的に決定できる，というのが古典的な逆解法 (stress tensor inversion) です．実際にすべった方向は， s_{az} と s_{pl} とセンス (N, R, D, S のいずれであるかということ) から計算できます．その際，第 i 番の断層の観察したスリップ方向と式 (6) から計算した理論スリップ方向とのなす

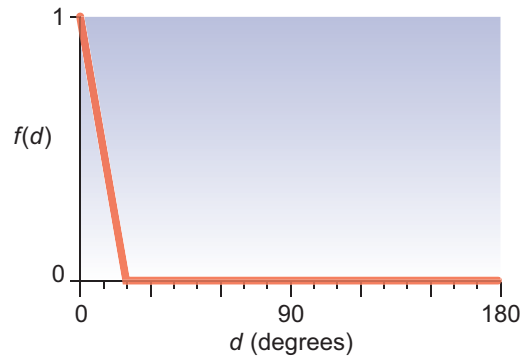


図 43 メインプロセッサが使っている関数 $f(d)$ ．

角 (ミスフィット角) を $d^{(i)}$ として，

$$S = f(d^{(1)}) + \dots + f(d^{(N)}), \quad (14)$$

を最小にする σ を探索するというスキームで最適応力が決定できます．ただし $f(d)$ は任意の減少関数で， N は断層の数です．図 43 は，メインプロセッサが使っている関数 $f(d)$ のグラフです．すなわち， $0 \leq d \leq 20^\circ$ で直線的に減少し， $d > 20^\circ$ ゼロの一定値をとります．

付録 D 多重逆解法の仕組み

多重逆解法は，データのリサンプリングにより，不均一なデータから複数の解を検出します．このセクション

では、まずソフトウェアが利用している計算格子点について説明します。次に、地質断層を扱う場合のリサンプリング法を述べ、次に発震機構の場合に進み、最後にこれらに共通した算法を説明します。

D.1 計算格子点

本ソフトウェアパッケージは、相異なる 60000 万種類の応力状態により、データから計算した任意の応力状態を代表させています。それらは、上記の球面上に配置した 60000 個の点に 1 つずつ対応づけられています。応力テンソルインバージョンの解を、それらの応力状態のひとつまたは幾つかで代表させようというわけです [37]。これを計算用の格子点 (computational grid points) とよぶことにします。すでに応力状態の間の距離 θ が定義されているので、与えられた任意の応力状態に最も近い応力状態を、この 60000 のなかから選ぶことは簡単です。

こうした戦略をとる場合、ひとつ重要なことがあります。それらの応力状態達が、等間隔であることです。幾らたくさんの応力状態を検討しても、似通った応力状態だけで圧倒的多数を占めるとするとどでしょう。パラメータ空間の球面上で、応力状態達に対応させた点達の分布に粗密があるということです。断層スリップデータが与えられたとして、それに対する正解の応力に対応する点が、この球面上に 1 点定義されますが、それが上記の点達が密に分布する領域にあれば、そのような応力状態がたまたま解であったときには精確な解が得られますが、点達の分布が疎である領域だったとすると、解の精度は悪いということです。どんなデータに対しても、解の精度が均一であることが望ましいことはいうまでもないでしょう。それ以上に多重逆解法の場合、この均一性には必要性があります。

5次元空間の単位球面をパラメータ空間とすることで、こうした要請を満たすことができるのです。この球面上に 60000 個の点を均一に配置する問題は、京都大学のスーパーコンピュータを使って解かれました [37]。さらに最近、均一性を向上させました [62]。こうして生成した 60000 種類の応力状態を、本ソフトウェアパッケージで使用しているのです。

この格子点がパラメータ空間に密に配置されているほど、解の精度 (precision) は高いといえます。ただしこの精度は、方法によるだけでなく、データにもよります。測定誤差などのノイズを多く含むデータでは、手法が精確でも、解の精度は当然落ちるということです。現在、5次元空間の単位球の上に、角距離にして約 10° 間隔で均

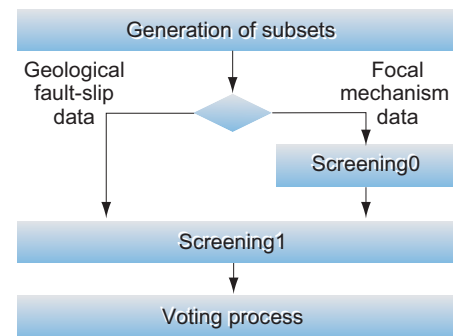


図 44 メインプロセッサの処理 (バージョン 6)。

等に、60000 点を配置しています。最近接格子点までの距離は、 7.94° から 9.51° の間にあり、平均が 8.79° 、標準偏差が 0.18° です [62]。Stress difference に換算すると、この間隔は約 0.17 です。これらの点を計算格子点として利用することに由来して、ノイズのない均一データを処理した場合、本ソフトウェアパッケージの精度は、主応力軸の方向にして 10° 程度、応力比にして 0.1 程度になっています。用意してある 60000 種類の応力状態が、たまたま解に一致していれば、その解はこの精度よりも高くなります。

D.2 アルゴリズム

D.2.1 地質断層データの部分集合生成

地質断層の場合、 k 個のデータを選んで、総数 ${}_N C_k$ 個の部分集合を生成します。 N は、データ数です。このあと、付録 D.2.3 のふるい分け処理になります。

D.2.2 発震機構データの部分集合生成

各発震機構には、2 枚の節面があり、そのいずれかが断層として動いたわけですが、断層面がどちらの節面なのか、わからないものとします。そして、どちらも断層として動いたと、まずは仮定します。ひとつの発震機構が、2 つの断層スリップデータを提供するものとするわけです。したがって、 N 個の発震機構データが与えられたなら、 $2N$ 個の断層スリップデータがあると考えます。そしてこの $2N$ 個の断層スリップデータから、上記の地質断層のときのように、 k 個のデータからなる部分集合達を ${}_{2N} C_k$ 個作ります。それらに対して古典逆解法を適用します。

ただし、 ${}_{2N} C_k$ 個の部分集合から、次の条件を満たすものを除外します。すなわち、 k 個の断層からなる部分集合が、ひとつの発震機構からの 2 つの断層スリップデータを含む場合、その部分集合を除外するわけです。インバージョンは独立したデータを集めてするべきものだから

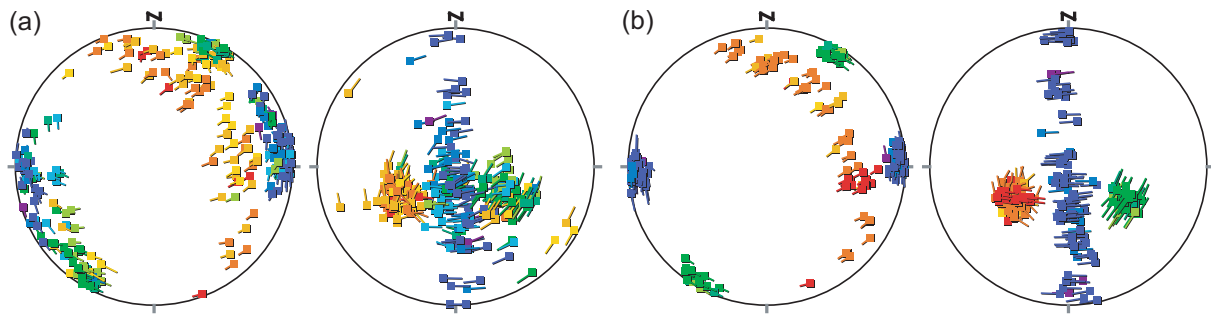


図 45 3つの応力状態を記録した不均一データを用いて、Screening1を施さない場合(a)と施した場合(b)との違いを示す。この違いは、メインプロセッサのバージョン4と5以降の違いに相当する。(a)と(b)では、enhance factorとdispersion factorは同じデフォルト値を用いて表示している。赤と青のオタマジャクシ記号が大円上に分布するのは、軸対称に近い応力状態であるため。文献[55]の人工データを使用。

らです。この条件づけこそが、発震機構に多重逆解法をあてはめる際の核心となるアイデアです[31, 32]。この処理を、Screening0とします(図44)。 $2^N C_k$ 個の部分集合のうち、この処理を通過するのは20~30%です[32]。70~80%がここではじかれるわけです。

D.2.3 部分集合のふるい分け

地質断層にせよ発震機構にせよ、上記のようにして多数の部分集合を生成するわけですが、それらを次の基準でふるい分けし、古典的逆解法で処理する部分集合の数を減らします。基準というのは、部分集合を構成する k 個のデータのすべてに適合する応力があるか無いかです。

断層スリップデータが与えられたら、任意の応力についてWallace-Bott仮説(式6)によりスリップ方向を計算し、実際のスリップ方向との差、すなわちミスフィット角が計算できます。このミスフィット角がある数値 d_T より小さい場合、その断層スリップデータはその応力で説明できる、または、適合すると言います。われわれは、 $d_T = 20^\circ$ を使います。

部分集合には k 個のデータがあり、応力をひとつ仮定すると、 k 個のミスフィット角が計算できます。仮定する応力により、それらは変化しますが、 k 個のミスフィット角を同時に d_T 未満にできないならば、その部分集合を説明できる応力は存在しないと考えることにします。そしてこの部分集合は捨てる、というふるい分けをするわけです。こうすることにより、無意味な解を捨て、正解となる解のクラスターを先鋭化することができる。これが文献[30]による多重逆解法の改良案です。メインプロセッサのバージョン4から5への変更は、このふるい分け法を取り入れたことに対応しています。このふるい分けを、Screening1とします(図44)。

この処理の効果について、正解のわかっている人工データを使って検討した結果を図45に示します。Screening1がない場合、正解の応力状態以外に、雑多な色のオタマジャクシ記号がバラバラと分布して、ノイズの大きな結果になっています。Screening1を通した場合は、3つの応力状態を示す青・緑・赤のクラスターは大円上に分布するものを除いて、正解の応力のところに密なクラスターをなしています。

多重逆解法を使うと、褶曲などで大きく傾いた岩体で小断層解析ができるのですが[63]、その場合はメインプロセッサ・バージョン4を使ってください。このバージョンではScreening1の処理が無いため、小断層達が傾くことによるデータの不均一性の増減が定量的にわかるようになっています。

D.2.4 計算格子点への投票

ふるい分けを通過してきた部分集合は、パラメータ空間に均一にばらまかれた60000の格子点に投票します。その結果、図46のように、入力したデータにとって正解とすべきものが浮かび上がってくるのです。

すなわち、この図の上段にならぶ灰色のカードは、それぞれが1つの断層スリップデータを表します。裏の色が青か赤かにより、その断層を動かしたのが、それぞれ応力Aと応力Bであることを示すのですが、解析者は裏の色を知らないとします。データは、この場合、4つずつの部分集合に分けられています。つまり $k=4$ の場合です。下段の青い球面で示されたパラメータ空間には、黒点で示された格子点が均等に配置されています。各部分集合は、緑色のコインで示される票をひとつ持っていて、図44のふるい分けにを通過したなら、格子点のひとつに投票すると考えましょう。当該の部分集合に古典的逆解

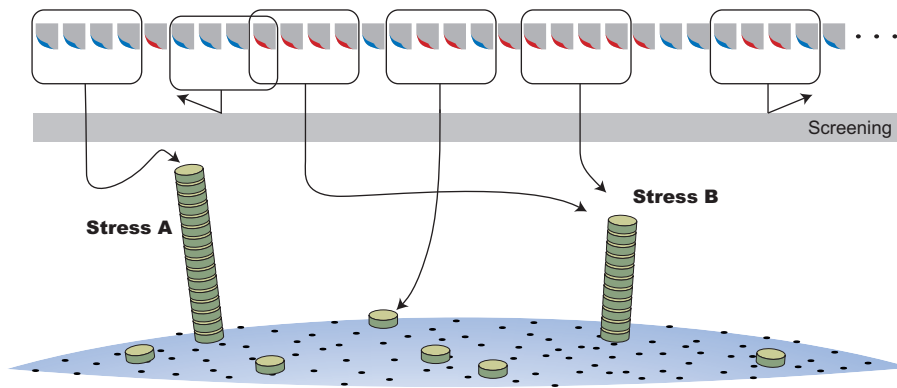


図 46 多重逆解法の原理を説明するための模式図．断層は灰色のカードで示されており，裏が青のカードは応力 A で動かされた断層，裏が赤のカードは応力 B で動かされた断層を表す．データの部分集合は，ふるい分け (Screening) を通過したら，パラメータ空間 (青い球面) の格子点に投票する．地質断層の場合 Screening は 1 段，発震機構の場合は 2 段からなる (図 44) ．

法を適用し，得られる解に最も近い格子点に 1 票投ずるわけです．裏が青いカードばかりからなる部分集合は，応力 A に対応した格子点に投票します．裏が赤いカードばかりの部分集合は，応力 B に対応した格子点に投票します．2 つ色が混在した部分集合は，Screening1 を通過しない可能性が高いのですが，たとえ通過したとしても，応力 A にも応力 B にも対応しない格子点に投票するでしょう．結果として，得票数の圧倒的に多い格子点を当選と認めることにするわけです (図 46) ．

もちろん分離可能なのは応力状態が 2 つの場合までというわけではなく，良好なデータなら 3 つ以上の応力状態が分離できます (図 45) ．断層面の方向にバリエーションが大きいほど，応力の分解能がよくなります ．

D.3 断層組み合わせ数

メインプロセッサは，断層組み合わせ数 k の値として，3 から 8 までの整数を受け取ることができます ．どの数が適当でしょうか ．データにもよりますが， $k = 5$ を推奨します ．図 47 の例でわかるように，この値が大きくなるほどクラスターのまとまりはよくなる傾向がありますが，その傾向は $k = 3 \sim 5$ が顕著で， $k > 5$ では大きな違いがありません ．したがって， $k = 5$ がよい選択であるというわけです ．

ちなみに， $k = 3$ の場合，応力テンソルインバージョンは解を持ちません ．応力状態を決定するには，4 条分以上の断層スリップデータが必要で^{*22} ．ところが図 47

^{*22} 決定される応力状態は，主応力軸の方向と応力比を規定するために，4 つの自由度を持ちます ．したがって，4 データ以上ないと，インバージョンに解が存在しないわけです ．

のように， $k = 3$ でもばらつきが大きいとはいえ， $k \geq 4$ の場合と似た解が得られています ．なぜでしょうか ．

多重逆解法は，応力テンソルインバージョンを多数回実行しています ． $k = 3$ の場合は，与えられたデータのなかから選んだ 3 データについて，インバージョンをしているわけです ．インバージョンの目的関数 (式 (14)) は，その場合，図 48 のグラフのようになります ．このグラフの横軸は，いろいろな応力状態のどれであるかを表し，縦軸は目的関数の値です ．インバージョンでやっているのは，この関数が最大値をとる応力状態を見つける，ということです ． $k = 3$ ではこのグラフに孤立したピークが存在せず，頭が平らな台地状のたかまりができるため，ユニークな最高点が存在しない ．そのために，唯一の解が確定できないというわけで，解が存在しないというわけです ．多重逆解法では，その場合でも，平らな台地の任意の点を最高点とみなしてしまうのです ．そういった任意の選択をきわめて多数回くりかえすため，その台地の高まりの範囲 (図 48 の “plateau” の範囲) に多数の解が配置されることになります ．その結果，この範囲がペアのステレオネットに写像されてみているのが， $k = 3$ の場合の多重逆解法の解です ．この写像については，文献 [55, 59] が説明しています ．

D.4 ノイズレベルと平均応力角距離

ノイズを含む均一データを多重逆解法で処理する場合，ノイズレベルが大きいほどメインウィンドウに現れるクラスターはばらけてきます ．どのくらいばらけているかが，平均応力角距離 $\bar{\theta}$ で表されるわけですが，その値とノイズレベルの間には，きれいな関係が成り立つことが

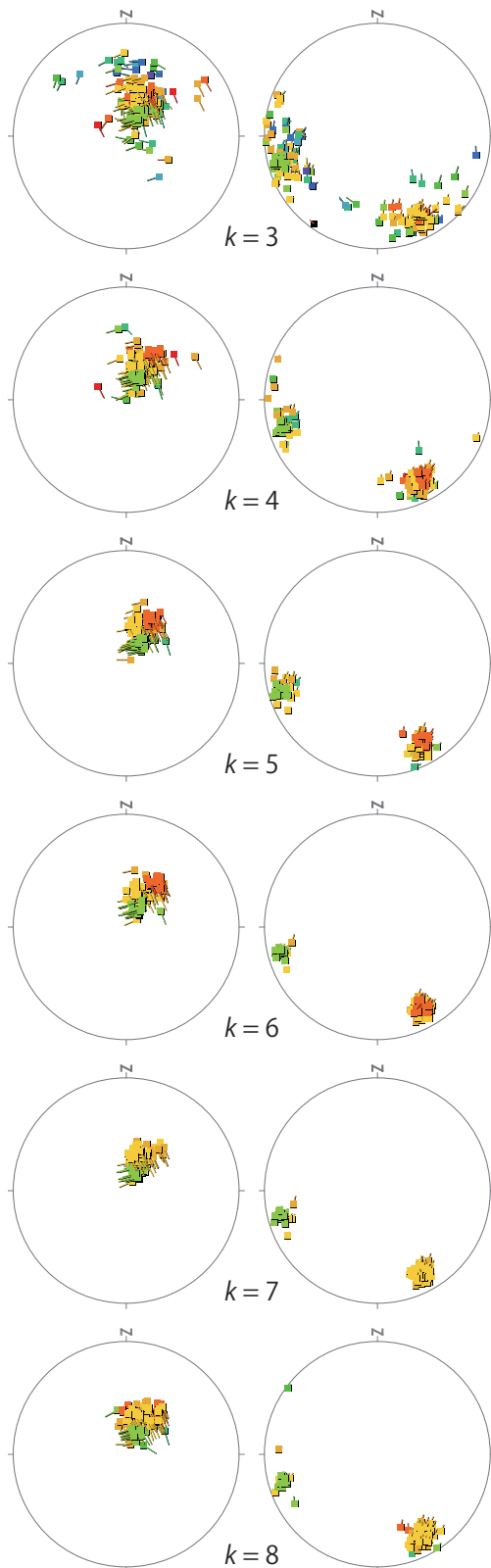


図 47 同一のデータセットに 3 から 8 までの断層組み合わせ数 k で多重逆解法を適用したときの結果．強調ファクター e は、すべてデフォルト値の 8．二つの応力を仮定して作った不均一データからの計算結果で、仮定して応力比は 0.6 と 0.7．

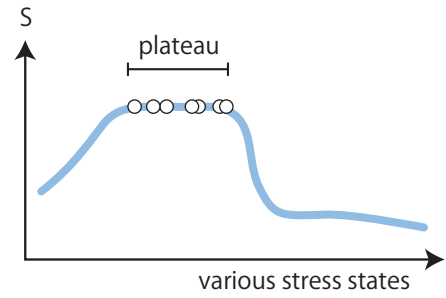


図 48 断層組み合わせ数 k が 3 の場合の目的関数 $S(\sigma)$ を説明するための模式図．丸印は、オタマジック記号が表す応力状態に対応する．

経験的に知られています^{*23}．

この関係について数値実験を行った結果が、図 49 に示されています．この図の横軸がデータのノイズレベル \bar{p} ですが、それは次のように定義された量です．ミスフィット角が、平均ゼロ、標準偏差が S_d である正規分布に従うとしたとき、ミスフィット角の期待値

$$\bar{p} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|x|}{\sqrt{2\pi}S_d} \exp\left(-\frac{x^2}{2S_d^2}\right) dx \approx 0.80S_d$$

としてノイズレベル \bar{p} を定義します．この式では、断

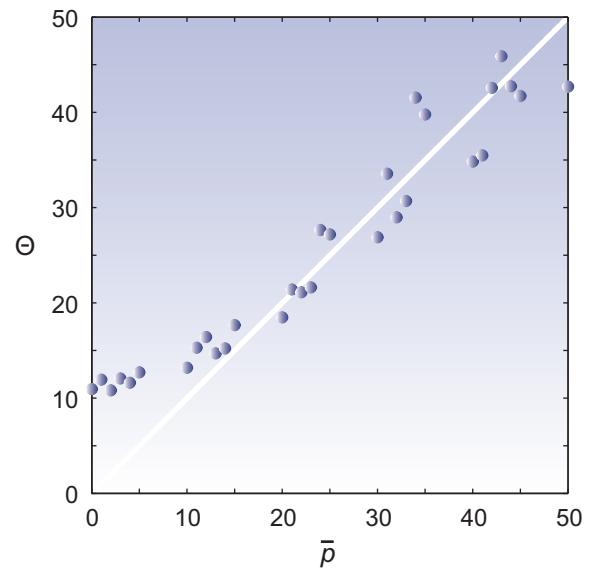


図 49 均一データに強度 \bar{p} のノイズを加えたデータを多重逆解法で処理して得られた解の平均応力角距離 $\bar{\Theta}$ との関係．後者は、デフォルトの強調ファクター $e = 8$ で測定．白い対角線は、 $\bar{\Theta} = \bar{p}$ の直線．

^{*23} 文献 [61] は、ブートストラップ解のばらつき $\bar{\Theta}$ の関係について述べていますが、同様の関係が多重逆解法の解でも成り立つというのが、このサブセクションの主題です．

層を真上からみたときに、理論すべり方向から実際のスリップ方向が時計回りにずれているなら、正符号のミスフィットである、というぐあいに符号を与えています。

このノイズレベルは角度の次元を持つ量なので、数値実験では、 0° から 50° までさまざまな強度のノイズを 50 条分の均一データに加えて、ノイズを含む均一データを何組も作りました。それらのデータセットを多重逆解法で処理して、得られた解の平均応力角距離を計算し、ノイズレベルと比べたのが図 49 です。明らかに、 $\bar{\rho}$ が $15\text{--}20^\circ$ より大きいところで、平均応力角距離がデータのノイズレベルとほぼ一致することがわかります。つまり、MI Viewer で計算できる応力角距離というパラメータは、データのノイズレベルを示していると考えて良いということです。しかし、ノイズレベルが $15\text{--}20^\circ$ より小さいと、 $\bar{\rho}$ がゼロに近づくにつれて平均応力角距離はゼロではなく約 10° に近づきます(図 49)。多重逆解法の解と違って文献 [61] では、こうした計算格子を使わなかったので、 $\bar{\rho} \rightarrow +0$ のときに平均応力角距離はちゃんとゼロに近づいています [61]。なぜ多重逆解法の場合、約 10° なのでしょう。使っている計算グリッドの細かさのため、というのがその答えです。付録 D.1 で説明したように、利用している計算格子点の間隔が約 10° なので、多重逆解法の解の精度は、 10° 程度です。このことが、 $\bar{\rho} \rightarrow +0$ としたときに $\bar{\theta}$ がゼロにならずに約 10° になる原因です。正解がたまたま格子点の 1 つに一致していたら、その格子点に対応した唯一の応力状態が多重逆解法の解になるので、 $\bar{\theta} = 0^\circ$ です。格子点のすきまに正解がある場合、正解のまわりのいくつもの格子点達が選ばれて、正解を近似する応力状態達として、多重逆解法の解になります。その場合、ノイズレベルがゼロでも、 $\bar{\theta}$ はゼロにならないわけです*24。この数値実験で $\bar{\rho} = 0^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ のときの解がどんなであったか、図 50 に示します。たしかに $\bar{\rho} = 0^\circ$ の場合でも、クラスターは半径 10° 程度の広がりを持っています。

こうした数値実験により、ノイズを含む均一データを多重逆解法で処理した場合について、次のことが言えます。メインウィンドウから平均応力角距離 $\bar{\theta}$ を計算すると、その値が $15\text{--}20^\circ$ を越えていれば、それがデータのノ

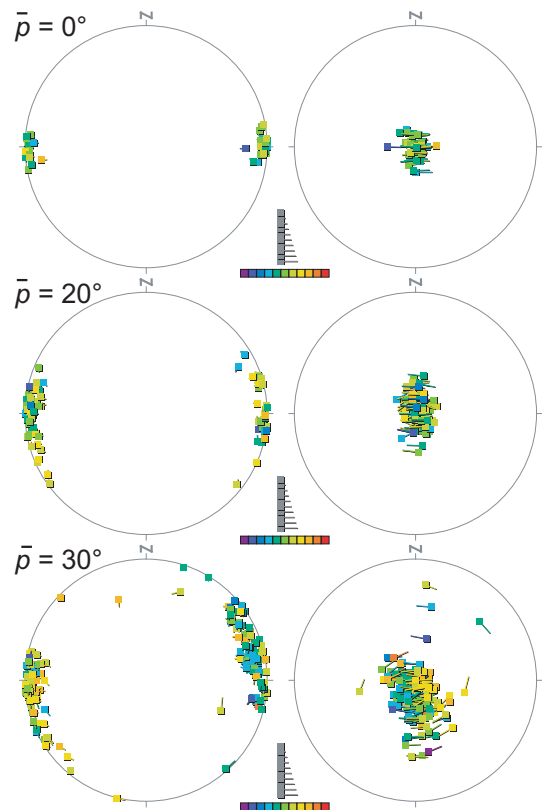


図 50 強度 $\bar{\rho}$ のノイズを加えた均一データを多重逆解法で処理して得られた解。enhance factor はデフォルト値の $e = 8$ だが、dispersion factor はゼロで描画。

イズレベルを表していると考えていいということです。また、 $\bar{\theta}$ が $15\text{--}20^\circ$ より小さければ、データのノイズレベルは $\bar{\theta}$ 値より小さいといえます*25。

付録 E 応力比と色との対応関係

MI Viewer のメインウィンドウでは、応力比の値がオタマジャクシの色で表現されていますが、この応力比と色との対応関係には、バージョン 4.15 までと 4.16 以降とでは、若干の違いがあります。古いバージョンで作った図と新しいバージョンで作った図を統合する場合、この違いが問題になります。新旧の色の RGB 値を、表 3 に示します。

*24 次元が高いほど、お隣さんの数が増えることに注意してください。例えば 1 次元では、お隣さんは両側あわせて 2 つしかありませんが、2 次元では長方形格子の場合、東西南北あわせてお隣さんは 4 つ。この調子で、空間の次元が多くなると、お隣さんの数が指数関数的に大きくなるわけです。

*25 ただし、符号付きのミスフィット角が正規分布に従うという報告も必然性もありません。したがって、この主張がどこまで妥当であるか、今のところ明確ではありません。

表3 応力比と色との対応関係。変更されたのは、灰色の行のRGB値。

Φ	Old			New		
	R	G	B	R	G	B
0.0	120	0	255	120	0	255
0.1	70	66	247	70	66	247
0.2	46	110	245	46	110	245
0.3	76	173	204	76	173	204
0.4	18	204	123	18	204	123
0.5	20	213	20	118	208	28
0.6	143	216	27	194	214	27
0.7	255	217	1	237	225	10
0.8	242	181	16	242	181	16
0.9	245	102	15	245	102	15
1.0	237	0	18	237	0	18

付録 F 記号一覧

D	stress difference
\bar{D}	mean stress difference
d	misfit angle
d_T	misfit threshold
k	fault combination number
N	number of data
N_G	number of computational grid points
N_p	number of plotted stress states
\boldsymbol{x}	unit vector in 5-dimensional Euclidean space representing a state of stress
$\bar{\boldsymbol{x}}$	unit vector corresponding to the average stress states
Θ	angular stress distance
$\bar{\Theta}$	mean angular stress distance
$\boldsymbol{\sigma}$	reduced stress tensor
$\bar{\boldsymbol{\sigma}}$	average stress state
σ_1	maximum principal stress
σ_2	intermediate principal stress
σ_3	minimum principal stress
Φ	stress ratio

参考文献

- [1] Angelier, J., 1979. Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, **5**, T17–T26.
- [2] Angelier, J., 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 5835–5848.
- [3] Angelier, J., 1994. Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In, Hancock, P. L., ed., *Continental Deformation*, Pergamon Press, Oxford, pp. 53–101.
- [4] 淡路動太・山本大介・高木秀雄, 2006. 棚倉破碎帯の脆性領域における運動履歴. *地質学雑誌*, **112**, 222–240.
- [5] Bott, M.H.P., 1959. The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, **96**, 109–117.
- [6] Carey, E. and Brunier, B., 1974. Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Serie D*, **279**, 891–894.
- [7] Çiftçi, N.B. and Bozkurt, E., 2009. Pattern of normal faulting in the Gediz Graben, SW Turkey. *Tectonophysics*, **473**, 234–260.
- [8] Eliassi, M. and Ahmadian, S., 2007. Determination of the geometrical configuration of σ_1 trajectory in Kan-Karaj area (Central Alborz) using Multiple Inverse Method. *Geosciences*, **67**, 140–149.
- [9] Eliassi, M., Mohajjel, M. and Mesbahi, F., 2008. Paleostress analysis of horizontal Plio-Quaternary deposits in the NW of Zanjan. *Journal of Earth and Space Physics*, **34**, 27–42.
- [10] Federico, L., Crispini, I. and Capponi, G., 2010. Fault-slip analysis and transpressional tectonics: a study of Paleozoic structures in northern Victoria Land, Antarctica. *Journal of Structural Geology* **32**, 667–684.
- [11] Freeman, T., 1999. *Procedures in Field Geology*. Blackwell Publishing, Malden.
- [12] Gephart, J.W. and Forsyth, D.W., 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence. *Journal of*

- Geophysical Research*, **89**, 9305–9320.
- [13] Havří, J. and Gilíková, 2007. Results of the structural study of the Culm sediments near Suchdol and Odrou. *Geological Research in Moravia and Silesia*, **14**, 52–55.
- [14] 平塚晋也・佐藤魂夫, 2008. 多重逆解法による 2004 スマトラ・アンダマン地震の震源域とその周辺における応力場の推定. 地震, 第 2 輯, **61**, 61–75.
- [15] 石井英一・安江健一・田中竹延・津久井朗太・松尾公一・杉山和稔・松尾重明, 2006. 北海道北部, 幌延地域における大曲断層の三次元分布と水理特性. 地質学雑誌, **112**, 301–314.
- [16] 石井英一・福島龍朗, 2006. 新第三紀珪質岩における断層の解析事例. 応用地質, **47**, 280–291.
- [17] Ishii, E., Sanada, H., Funaki, H., Sugita, Y. and Kurikami, H., 2011. The relationships among brittleness, deformation behavior, and transport properties in mudstones: An example from the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan. *Journal of Geophysical Research*, **116**, B09206.
- [18] 国安 稔・山田泰広, 2004. 中央北海道南部地域の深部構造. 石油技術協会誌, **69**, 131–144.
- [19] 楠橋 直・山路 敦, 2001. 愛媛県面河地域の久万層群が示す中新世テクトニクス. 地質学雑誌, **107**, 25–40.
- [20] Liesa, C.L. and Lisle, R.J., 2004. Reliability of methods to separate stress tensors from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, **26**, 559–572.
- [21] Lunina, O.V. and Gladkov, A.S., 2008. Active faults and crustal stress in the northeastern flank of the Baikal rift system. *Russian Geology and Geophysics*, **49**, 113–123.
- [22] Lunina, O.X., Gladkov, A.S., Novikov, I.S., Agatova, A.R., Vysotskii, E.Y. and Emanov, A.A., 2008. Geometry of the fault zone of the 2003 Ms = 7.5 Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai. *Tectonophysics*, **453**, 276–294.
- [23] Michael, A.J., 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: A control study. *Journal of Geophysical Research*, **92**, 357–368.
- [24] 南沢智美・桑野一彦・坂口有人・橋本善孝, 2006. 四国古第三系四万十帯室戸層の構造解析と応力場解析. 構造地質, **49**, 87–98.
- [25] Morris, A., Ferrill, D.A. and Henderson, D.B., 1996. Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, **24**, 275–278.
- [26] Orife, T. and Lisle, R.J., 2003. Numerical processing of palaeostress results. *Journal of Structural Geology*, **25**, 949–957.
- [27] Osozawaa, O. and Pavlis, T., 2007. The high P/T Sambagawa extrusional wedge, Japan. *Journal of Structural Geology*, **29**, 1131–1147.
- [28] Otsubo, M., Sato, K. and Yamaji, A., 2006. Computerized identification of stress tensors determined from heterogeneous fault-slip data by combining the multiple inverse method and k-means clustering. *Journal of Structural Geology*, **28**, 991–997.
- [29] 大坪 誠・重松紀生・北川有一・小泉尚嗣, 2009. 南海トラフ沈み込み帯前弧陸域での応力場変遷: 熊野市井内浦および紀北町海山観測点コアをきる断層面を用いて. 地質学雑誌, **115**, 457–469.
- [30] Otsubo, M. and Yamaji, A., 2006. Improved resolution of the multiple inverse method by eliminating erroneous solutions. *Computers & Geosciences*, **32**, 1221–1227.
- [31] 大坪 誠・山路 敦・久保篤規, 2007. 不均一な発震機構データから応力を分離する応力テンソルインバージョンの開発とその適用. 月刊地球, **29**, 292–296.
- [32] Otsubo, M., Yamaji, A. and Kubo, A., 2008. Determination of stresses from heterogeneous focal mechanism data: An adaptation of the multiple inverse method. *Tectonophysics*, **457**, 150–160.
- [33] Pasquale, G., De Matteis, R., Romeo, A. and Maresca, R., 2009. Earthquake focal mechanisms and stress inversion in the Irpinia Region (southern Italy). *Journal of Seismology*, **13**, 107–124.
- [34] Pêcher, A., Seeber, L., Guillot, S., Jouanne, F., Kausar, A., Latif, M., Majid, A., Mahéo, G., Mugnier, J.L., Rolland, Y., van der Beek, P. and Van Melle, J., 2008. Stress field evolution in the northwest Himalayan syntaxis, northern Pakistan. *Tectonics*, **27**, TC6005.
- [35] Ramsay, J. and Lisle, R.J., 2000. *The Techniques of Modern Structural Geology, Volume 3: Applications of Continuum Mechanics in Structural Geology*. Academic Press, New York.

- [36] Sato, K. and Yamaji, A., 2006a. Embedding stress difference in parameter space for stress tensor inversion. *Journal of Structural Geology*, **28**, 957–971.
- [37] Sato, K. and Yamaji, A., 2006b. Uniform distribution of points on a hypersphere for improving the resolution of stress tensor inversion. *Journal of Structural Geology*, **28**, 972–979.
- [38] 佐藤活志・山路敦・大坪誠, 2007. 応力逆解析のための解空間. 月刊地球, **29**, 297–300.
- [39] Sippel, J., Saintot, A., Heeremans, M. and Scheck-Wendoroth, M., 2010. Paleostress field reconstruction in the Oslo region. *Marine and Petroleum Geology*, **27**, 682–708.
- [40] Sippel, J., Scheck-Wendoroth, M., Reicherter, K. and Mazur, S., 2009. Paleostress states at the south-western margin of the Central European Basin System—Application of fault-slip analysis to unravel a polyphase deformation pattern. *Tectonophysics*, **470**, 129–146.
- [41] 富田智・山路敦, 2001. 共役断層による小断層解析はすべて誤りか? 新潟県新津丘陵における多重逆解法と共役断層法との比較. 地質学雑誌, **107**, 711–721.
- [42] 富田智・山路敦, 2003. 傾動補正ソフトウェアの開発. 情報地質, **14**, 85–104.
- [43] Twiss, R.J. and Moores, E.M., 1992. *Structural Geology*, W.H. Freeman, New York.
- [44] Vasseur, G., Etchecopar, A. and Philip, H., 1983. Stress state inferred from multiple focal mechanisms. *Annales Geophysicae*, **1**, 291–298.
- [45] Veloso, E.E., Anma, R. and Yamaji, A., 2009. Ophiolite emplacement and the effects of the subduction of the active Chile Ridge System: Heterogeneous paleostress regimes recorded on the Taitao Ophiolite (southern Chile). *Andean Geology*, **36**, 3–16.
- [46] Viola, G., Venvik Ganerød, G. and Wahlgren, C.-H., 2009. Unraveling 1.5 Ga of brittle deformation history in the Laxemar-Simpevarp area, southeastern Sweden: A contribution to the Swedish site investigation study for the disposal of highly radioactive nuclear waste. *Tectonics*, **28**, TC5007.
- [47] Wallace, R. E., 1951. Geometry of shearing stress and relationship to faulting. *Journal of Geology*, **59**, 111–130.
- [48] Yamada, Y. and Yamaji, A., 2002. Determination of paleo-stresses from mesoscale shear fractures in core samples using the multi-inverse method. *Journal of Petroleum Geology*, **25**, 203–218.
- [49] 山路敦, 1999. 多重逆解法: 複数の応力を検出する小断層解析の手法. 構造地質, **43**, 79–88.
- [50] Yamaji, A., 2000a. Multiple inverse method applied to mesoscale faults in mid Quaternary sediments near the triple trench junction off central Japan. *Journal of Structural Geology*, **22**, 429–440.
- [51] Yamaji, A., 2000b. The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, **22**, 441–452.
- [52] 山路敦, 2000. 理論テクトニクス入門: 構造地質学からのアプローチ. 朝倉書店.
- [53] 山路敦, 2001. 小断層用ステレオネットプログラムの開発. 情報地質, **12**, 167–182.
- [54] 山路敦, 2001. 新しい小断層解析. 地質学雑誌, **107**, 461–479.
- [55] Yamaji, A., 2003. Are the solutions of stress inversion correct? Visualization of their reliability and the separation of stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, **25**, 241–252.
- [56] Yamaji, A., 2003. Slab rollback suggested by latest Miocene to Pliocene forearc stress and migration of volcanic front in southern Kyushu, northern Ryukyu arc. *Tectonophysics*, **364**, 9–24.
- [57] 山路敦, 2007. 地質学における応力テンソルインバージョン法の進歩. 月刊地球, **29**, 288–291.
- [58] 山路敦・長谷義隆・鳥井真之, 2003. 鮮新統入吉層の小断層による古応力推定と南九州における鉾脈鉾床形成期の地殻応力. 資源地質, **53**, 217–225.
- [59] Yamaji, A., Otsubo, M. and Sato, K., 2006. Paleostress analysis using the Hough transform for separating stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, **28**, 980–990.
- [60] 山路敦・大坪誠・佐藤活志, 2008. ボーリングコアから断層スリップデータを取得する方法. 地質学雑誌, **114**, 250–255.
- [61] Yamaji, A. and Sato, K., 2006. Distances for the solutions of stress tensor inversion in relation to misfit angles that accompany the solutions. *Geophysical*

Journal International, **167**, 913–942.

- [62] Yamaji, A. and Sato, K., 2011. A spherical code and stress tensor inversion. *Computers & Geosciences*, in press. doi:10.1016/j.cageo.2011.04.016 .
- [63] Yamaji, A., Tomita, S. and Otsubo, M., 2005 Bedding tilt test for paleostress analysis. *Journal of Structural Geology*, **27**, 161–170.

索引

Angular stress distance, 29

Bedding tilt test, 4

Dispersion factor, 15

Enhance factor, 13

FDT format, 18
FMD format, 19

${}_N C_k$, 6

Wallace-Bott hypothesis, 26

Wallace-Bott 仮説, 26

FMD 形式, 19
FDT 形式, 18

応力角距離, 29
応力状態, 1, 27
応力比, 8
オタマジャクシ記号, 8

換算応力テンソル, 28

規格化応力テンソル, 28
強調ファクター, 13

計算用の格子点, 33

Stress difference, 29

節面, 19

断層組み合わせ数, 6, 35
断層スリップデータ
 均一—, 1
 不均一—, 1

平均応力角距離, 31
平均 stress difference, 31

ポストプロセッサ, 6
 —のデータウィンドウ, 7
 —のメインウィンドウ, 7

ミスフィット角, 32

メインプロセッサ, 4

理論すべり方向, 27

