

小断層の多重逆解法による古地殻応力推定法の確立

課題番号 14540423

平成14・15・16年度
科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))

研究成果報告書

京 都 大 学 図 書



1050577917

山路敦氏寄贈

附 属 図 書 館

年5月6日

研究代表者 山路 敦
京都大学大学院理学研究科助教授

小断層の多重逆解法による古地殻応力推定法の確立

まえがき

研究成果概要

■ 課題番号 14540423

■ サクセスへの道

■ 平成14・15・16年度

科学研究費補助金 (基盤研究(C)(2))

引用文献

研究成果リスト

原著論文

総論

断層応力

断層での口頭発表

付 録

多断層解析ソフトウェアマニュアル

代表的論文の印刷

研究成果報告書

平成17年5月6日

研究代表者 山路 敦
京都大学大学院理学研究科助教授

まえがき

本書は、平成 11 年度から 16 年度までの 6 年間にわたり、科学研究費補助金(新学術研究(CXS))の助成を受けた研究課題「小断層の多重逆解法による古地磁気力場定場の確立」に関する研究成果をまとめたもの **目次**

本書は、小断層帯の理論的研究と、最新理論に基づく解析法をソフトウェアに適用し、古地磁気力場定場を行うという、理論・プログラミング・野外調査と3つの面から研究を進めていくという方針で、世界最先端の研究を行っている。当初想定で、地質データから複数の古地磁気力場を算出する手法(多重逆解法)を開発した。本助成のおかげで、多重逆解法のソフトウェアを構築することができ、昨年には、地質学への応用が期待できるソフトウェアを世界に向けて公開した。また、平成 16 年度末には小断層帯の理論・プログラミングを公開する公開事業への努力をはじめている。	1
研究成果概要	3
背景	3
テクニクスへの応用	3
方法論的研究	4
公開事業	5
引用文献	6
研究成果リスト	9
原著論文	9
総説その他	10
国際会議での口頭発表	10
国内での口頭発表	11
付 録	13

多重逆解法ソフトウェアマニュアル	13
代表的論文の別刷	14
平成 16 年度(2004 年度)	15
平成 17 年度(2005 年度)	16

まえがき

本報告書は、平成 14 年度から 16 年度までの 3 年間にわたり、科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))の助成を受けた研究課題「小断層の多重逆解法による古地殻応力推定法の確立」に関する研究成果をまとめたものである。

筆者は、小断層解析の理論的探究と、最新理論に基づく解析法をフィールドに適用し、応力場変遷史を再検討するという、理論・プログラミング・野外調査と 3 つの面で研究を進めており、それらに関して世界の最先端の研究を行っている。当研究室では、小断層データから複数の応力を分離する手法(多重逆解法)を開発した。本助成のおかげで多重逆解法のソフトウェアを使いやすいかたちに整備することができ、昨秋には同ソフトウェアを世界に向かって無料で公開した。また、平成 16 年度末には小断層解析法のワークショップを開催するなど、普及への努力をはじめている。

本報告書は、研究成果の概要、研究実績、公開したソフトウェアのマニュアル(英語版・日本語版)、代表的論文の収録からなっている。

研究組織 研究代表者 山路 敦 京都大学大学院理学研究科助教授

研究経費	平成 14 年度(2002 年度)	1, 7 0 0 千円
	平成 15 年度(2003 年度)	8 0 0 千円
	平成 16 年度(2004 年度)	8 0 0 千円
	計	3, 3 0 0 千円

【アライエックルへの感謝】

この問題を解くために、筆者は多重逆解法(multiple inverse method)という計算手法を 2000 年に開発し(Yamaji, 2000b)。すでに発表の方法により小断層から古応力が推定されていた断層地帯・御前地帯・宮崎地帯などに適用し、その有効性を示した(Yamaji, 2000a, 2001; Yamaji et al., 2000)。その結果、それらの地帯で推定されていた応力場変遷史が誤りだ(セッテラ)であったりすることをお明らかにすることができた。断層地帯と御前地帯では、東海地帯のあいだでより複雑な応力場が形成されたことがわかり、断層地帯の応力状態の不安定性を指摘した(Yamaji et al., 2003)。また、宮崎地帯の応力場変遷史と、御前地帯の★(活動期)などから、約 400 万年前に九州の下でスラブの断層が増大したこ

研究成果概要

【背景】

小断層にもとづいて古地殻応力を推定する研究、いわゆる小断層解析は、1960年代後半から70年代初めにかけて、我が国でさまざまな地域に適用された。その成果を背景として、小断層解析の技法はかつて、地質系の野外教育で広く教授されていた。しかし方法論の面で、その時代の小断層研究は十分ではなく、そのため1980年代になると、そうした研究・教育はすっかり下火になってしまった。

ところが海外では、1980年代から小断層解析の方法論的大発展が起こった。我が国で小断層研究が忘れられているあいだに、かつて日本で行われていた小断層解析法とは、解析手法の面ですっかり様変わりしてしまったのである。このことは、先端的解析法を使えば、我が国でも以前とは違った応力史の描像が再び描ける可能性が拓かれたこということを意味する。こうした状況のもと、筆者は90年代末に小断層解析の方法論的探求と、日本列島への適用と、2つの面に関する研究を開始した。

この分野における90年代以降の重要な課題は、複数の応力を記録している断層群から、いかにしてそれらの応力を検出するかという問題であった。異なる応力状態のもとに活動した断層が混在している場合、それらの断層を露頭での見かけにより分類し、その後個々の群について古応力を計算するという手続きが広く行われている。しかし、見かけによる分類は簡単ではない。特に日本列島のように活動的な地域では、困難でさえある。

そこで、90年代半ばからは、そうした複雑な断層スリップデータを数値的に分類するアルゴリズムを探求し、あるいは複数の応力を数値的に分離する方法の探求が行われるようになった。この問題は、非線形でなおかつ非凸問題を解くことと等しい。したがって、多変量解析など常套的な手段では解決できず、この問題に特化したインバース法を構成する必要がある。

【テクトニクスへの応用】

この問題を解くために、筆者は多重逆解法(multiple inverse method)という計算手法を2000年に提唱し(Yamaji, 2000b)、すでに従来の方法により小断層から古応力が推定されていた房総地域・掛川地域・宮崎地域などに適用し、その有効性を示した(Yamaji, 2000a, 2003; Yamaji et al., 2003)。その結果、それらの地域で推定されていた応力場変遷史が誤りだったり不十分であったりすることを明らかにすることができた。房総地域と掛川地域では、第四紀のあいだでさえ複数回の応力場転換が起こったことがわかり、前弧域の応力状態の不安定性を指摘した(Yamaji et al., 2003)。また、宮崎地域の応力場変遷と、周辺地域の火山活動史などから、約400万年前に九州の下でスラブの傾角が増大したこ

とを指摘した(Yamaji, 2003). またさらに、南九州に特有の鮮新世・更新世の鈹脈鈹床が、人吉地域や宮崎地域における 400 万年以降の伸張応力場のもとで形成された可能性が高いことを指摘した(山路ほか, 2003).

新しい小断層解析手法によって鮮新更新世の応力場変遷史を塗り替えるという仕事で 1 つの到達点を示すのが、Otsubo et al. (submitted) による琉球弧南西部の研究で、現在の応力場がこの地域では 12.5 万年前より後に成立したことが示された。応力場変遷の現代史がいつ始まったかという問題は、地域によって異なる答えがあるに違いない。しかし Otsubo らの研究は、世界で最も精密な答えを与えたことになる。それを可能にしたのは、隆起石灰岩の精密層序と多重逆解法であった。

さらにまた、時代をさかのぼって、前期中新世の地層中の小断層群に、多重逆解法を適用した。能登半島輪島地域の縄文層の小断層である(小林ほか, 2005)。その結果は鮮新・更新統の小断層群にくらべて複雑ではあるが、地質図規模の地質構造と調和的な応力が検出され、この年代の小断層に対する手法の有効性が示された。

【方法論的研究】

方法論の面でも、本基盤研究の実施中に大きな進展をみた。複数の応力が断層スリップデータからインバース法の解として得られたなら、それらの解のあいだの隔たりをいかにして定量化するかという問題が解かれことがブレイクスルーとなって、ここ 2 年ほどの間の急激な進展が実現した。断層スリップデータからは、応力の絶対値が求まるわけではない。応力テンソルは対象なので、一般に 6 つの自由度を持つが、断層群から決定できるのは 4 自由度でしかない。そのようにして決定された 4 自由度の解の集合があって、その要素の間の隔たり、あるいは非類似度をいかに定量化すべきか筆者は探求していたが、一步先んじてそれを解決したのは Orife and Lisle (2003) であった。彼らは stress difference というパラメータを導入し、その定量化に成功した。Orife らに先を越されたものの、この問題を考える課程で粒子ファブリックの平均とその信頼範囲を決定する問題との関連性に気づき、その方面の研究論文をこの間に執筆した(Yamaji and Masuda, 2005; Yamaji, 2005, submitted).

Orife and Lisle (2003) が提案した stress difference という指標を利用することにより、多重逆解法で得られる応力群の平均と、群を構成する規格化された応力群のばらつきとを定量化することができるようになった。それらを利用し、さらに古地磁気学で行われている褶曲テストの手法を組み合わせ、小断層解析でも褶曲テストが行えることをしめした(Yamaji et al., 2004)。個々の断層について形成年代を知ることが困難なので、褶曲形成と断層形成との相対的前後関係をも未知量として、インバース法を構成したわけである。これまで大きく傾いた岩体中の小断層から古応力を推定することは困難であった。断層と褶曲との前後関係がわからないからである。この問題に、1 つの答えを与えたわけである。この手法は、新潟県の渋海川向斜に最初に適用された。その際、富田・山路

(2003)による断層スリップデータの傾動補正ソフトウェアが役立てられた。

本補助金による方法論的研究で、もうひとつさらに重要な進展があった。断層スリップデータから応力を求めるインバース問題が、5次元の単位球面上の点を探索する問題に帰着できたことである(Sato and Yamaji, 2005a, submitted)。断層スリップデータはこの面上の点群として表現され、それらに 180° の弧長の大円弧をフィッティングすることにより、その極の一方として応力が表現されるのである。さらにまた、その単位球上の2点間のユークリッド距離が **stress difference** に等しくなることを示すことができる。

断層スリップデータから応力を求めるインバース法は、非線形非凸問題を解くことになるので、データに対する様々な応力状態の適合性を試行錯誤的にチェックすることになるのだが、その際の計算グリッドが、インバース法の5次元球を使った定式化により、能率的に設計できるようになった。具体的には、この球面上に等間隔に計算グリッドを分布する場合に、応力の分解能・計算精度・効率の点で、最適な計算グリッドとなる。そこで、Sato and Yamaji (2005b, submitted)は本補助金によりスーパーコンピュータを使用した。そして、ほぼ等間隔に6万の点をこの球面上に分布させることに成功した。その結果、多重逆解法の計算精度と応力の分解能を向上させることができた。

多重逆解法の解は、この球面上に分布する点のクラスターとして表現される。そこで、Otsubo et al. (submitted)は非階層的クラスター解析のアルゴリズムを導入し、それらのクラスター中心とクラスターの広がりとを自動決定することに成功した。これまで多重逆解法の結果として得られるクラスターは、ステレオネットに応力主軸をプロットし、目の子でクラスターを認定していた。そのため、認定に主観性があったが、クラスター解析を組み合わせることにより、敷居値の任意性は残るものの、認定の主観性を排除することができるようになった。

【公開事業】

このように、多重逆解法を中心として、方法論を掘り下げ、プログラムを整備したうえで、平成16年(2004年)9月末に多重逆解法のソフトウェアを世界に向けて公開した。

<http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~yamaji/PDS/>からWindows用に開発した同ソフトウェアをダウンロードし、無料で使えるようにしたわけである。ソフトウェアに添付したマニュアルを、本報告書に添付する。また、傾動補正用のソフトウェア KUT や、断層スリップデータを表示するステレオネットソフトウェア SFSA などの小断層解析用ソフトウェアツールも、上記の URL で公開した。

平成16年度末には「小断層解析ワークショップ」と銘打った2日にわたる会を開催した。この会には、他大学の教官と学生ならびに企業から、あわせて22名が参加した。図1にプログラムを掲げるが、初日は筆者とともに、筆者が指導している大学院博士課程の学生3名が講師となって、京都大学理学部において講義と計算機実習を行った。2日目は大阪府泉南郡岬町住吉から和歌山県和歌山市加太にかけての海岸で、断層を見学

表1 小断層解析ワークショップのプログラム

【3月26日(土)】講義と計算機実習	
場所：京都大学理学部6号館5階地質学鉱物学教室実験室	
14:00~14:15	オリエンテーション(山路)
14:20~15:20	小断層解析総説(山路)
・小断層とは何か ・何になるか ・応力とは何か ・研究史 (Anderson 理論, 共役断層法, Wallace-Bott, 逆解法, 多重逆解法) ・多重逆解法による研究事例紹介	
15:20~16:00	小断層解析法の最先端の紹介
・パラメータ空間と stress difference, 他 (佐藤) ・クラスター解析による応力自動認定 (大坪)	
16:00~16:40	露頭での観察法と記載法 (大坪)
16:40~18:00	参加者が持参するパソコンを使った解析実習
・フィールドノートから数値データファイルへの変換 (富田) ・多重逆解法による解析の実際・秘訣 (佐藤) ・傾動補正する場合の解析 (大坪)	
資料配付 (無料)	
【3月27日(日)】巡検 (和歌山県和歌山市加太海岸)	
8:00	JR京都駅中央改札にて集合
9:22	南海電鉄難波発, 南海本線急行(和歌山市行)
10:10	みさき公園着
10:13	みさき公園発, 南海多奈川線(多奈川行)
10:19	多奈川着
10:40	多奈川駅にて中日臨海バス乗車 (岬町内巡回バス)
10:56	小島住吉バス停着
海岸に沿って巡検	
16:00頃	南海電鉄加太駅にて解散

する地質巡検を行った。ワークショップのプログラムを表1に、写真を図1に示す。同様のワークショップを、今秋の日本地質学会年会の折りにも主催する予定である。

このように、本補助金による一連の研究により、多重逆解法による古地殻応力の研究手法を確立し、一般に普及する基盤が実現したわけである。これを今後はさらに伸ばしてゆきたい。

【引用文献】

- 小林博文・山路 敦・増田富士雄, 2005. 能登半島輪島地域の中新統の層序・堆積環境・テクトニクス. 地質学雑誌, **111**, 印刷中(6月号).
- Orife, T. and Lisle, R.J., 2003. Numerical processing of paleostress results. *Journal of Structural Geology*, **25**, 949-957.
- Otsubo, M., Hayashi, D., Yamaji, A., Yamada, S. and Matsuda, H., submitted. Latest Pleistocene emergence of arc-parallel extensional stress in the southern Ryukyus, Japan. *Journal of Structural Geology*.
- Otsubo, M., Sato, K. and Yamaji, A., 2005. 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*, submitted.
- Sato, K. and Yamaji, A., 2005a. An improved formulation of stress tensor inversion and its application to error estimation. *Journal of Structural Geology*, submitted.
- Sato, K. and Yamaji, A., 2005b. Uniform search grid for stress tensor inversion. *Journal of Structural Geology*, submitted.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Yamaji, A., 2005. Finite tectonic strain and its error, as estimated from elliptical objects with a class of initial preferred orientations. *Journal of Structural Geology*, submitted.
- 山路 敦・長谷義隆・鳥井真之, 2003. 鮮新統人吉層の小断層による古応力推定と南九州における鉼脈鉼床形成期の地殻応力. 資源地質, **53**, 217-225.
- Yamaji, A. and Masuda, F., 2005. Improvements in graphical representation of fabric data, showing the influence of aspect ratios of grains on their orientations. *Journal of Sedimentary Research*, **75**, 517-522.
- Yamaji, A., Sakai, T., Arai, K. and Okamura, Y., 2003. Unstable forearc stress in the eastern Nankai subduction zone for the last two million years. *Tectonophysics*, **369**, 103-120.
- Yamaji, A., Tomita, S. and Otsubo, M., 2005. Bedding tilt test for paleostress analysis. *Journal of Structural Geology*, **27**, 161-170.

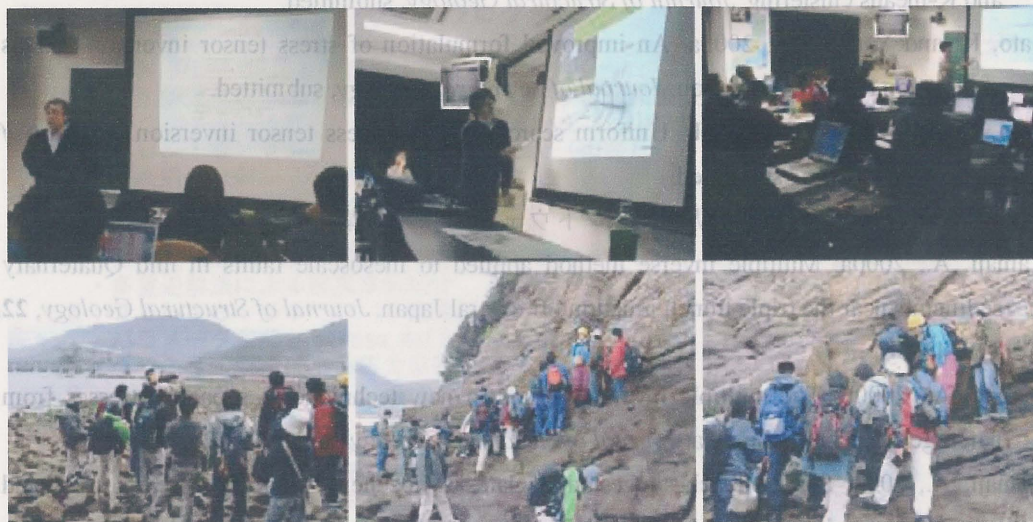


図1 2005年3月26・27日に開催した小断層解析ワークショップ風景。上段：初日の講義と計算機実習。下段：2日目に行った和泉層群における断層見学巡検。

class of initial preferred orientations. *Journal of Structural Geology*, submitted.

山崎・渡・長谷義隆・島井真之, 2003. 鮮新紀人吉層の小断層による古びな推定と南九州における鉱脈形成期の地殻応力. *資源地質*, 53, 217-225.

Yamaji, A. and Masuda, F., 2005. Improvements in graphical representation of fabric data, showing the influence of aspect ratios of grains on their orientations. *Journal of Sedimentary Research*, 75, 517-522.

Yamaji, A., Sakai, T., Arai, K. and Okamura, Y., 2003. Unstable forearc stress in the eastern Nankai subduction zone for the last two million years. *Tectonophysics*, 369, 103-120.

Yamaji, A., Tomita, S. and Otsubo, M., 2005. Bedding tilt test for paleostress analysis. *Journal of Structural Geology*, 27, 161-170.

【引用文献】

- 小林博文・山崎・渡・島井真之, 2002. 南九州の地殻構造と断層の活動性. *地質学雑誌*, 78, 111-124.
- Ortleib, T. and Lisle, R.J., 2003. Numerical processing of paleostress results. *Journal of Structural Geology*, 25, 949-957.
- Otsubo, M., Hayashi, D., Yamaji, A., Yamada, S. and Masuda, H., submitted. Latest Paleocene extensional tectonics in the southern Ryukyu Islands. *Journal of Structural Geology*.
- Otsubo, M., Sato, K. and Yamaji, A., 2003. Computerized identification of stress tensors from microstructural data. *Journal of Structural Geology*, 25, 101-110.

研究成果リスト

原著論文

- (1) Yamaji, A., 2003. Are solutions of stress inversion correct? A new method to visualize their reliability and to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, **25**, 241–252.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Yamaji, A., Sakai, T., Arai, K. and Okamura, Y., 2003. Unstable forearc stress in the eastern Nankai subduction zone for the last two million years. *Tectonophysics*, **369**, 103–120.
- (5) 山路 敦・長谷義隆・鳥井真之, 2003. 鮮新統人吉層の小断層による古応力推定と南九州における鉱脈鉱床形成期の地殻応力. 資源地質, **53**, 217–225.
- (6) Yamaji, A., Tomita, S. and Otsubo, M., 2005. Bedding tilt test for paleostress analysis. *Journal of Structural Geology*, **27**, 161–170.
- (7) Yamaji, A. and Masuda, F., 2005. Improvements in graphical representation of fabric data, showing the influence of aspect ratios of grains on their orientations. *Journal of Sedimentary Research*, **75**, 517–522.
- (8) 小林博文・山路 敦・増田富士雄, 2005. 能登半島輪島地域の中新統の層序・堆積環境・テクトニクス. 地質学雑誌, 印刷中.
- (9) Yamaji, A., submitted. Finite tectonic strain and its error, as estimated from elliptical objects with a class of initial preferred orientations. *Journal of Structural Geology*.
- (10) Otsubo, M., Sato, K. and Yamaji, A., submitted. 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*.
- (11) Sato, K. and Yamaji, A., submitted. An improved formulation of stress tensor inversion and its application to error estimation. *Journal of Structural Geology*.
- (12) Sato, K. and Yamaji, A., submitted. Uniform search grid for stress tensor inversion. *Journal of Structural Geology*.
- (13) Yamaji, A., Sato, K. and Otsubo, M., submitted. Influence of the heterogeneity of fault-slip data on stress tensor inversion and the improved Ginkgo method. *Journal of Structural Geology*.
- (14) Otsubo, M., Hayashi, D., Yamaji, A., Yamada, S. and Matsuda, H., submitted. Latest

Pleistocene emergence of arc-parallel extensional stress in the southern Ryukyus, Japan.
Journal of Structural Geology.

総説その他

- (1) 山路 敦・山田泰広・有坂春彦・平野真史・飯田真司・今村哲己・加藤 新・高橋利宏・高尾晶彦・山足友, 2002. 天津小湊松ヶ鼻の天津層の小断層群から検出された応力. 構造地質, **46**, 33-36.
- (2) 山路 敦, 2004. 新潟褶曲帯にみられる褶曲成長に不調和だが流体上昇に有利な応力. 石油技術協会誌, **69**, 181-189.
- (3) 山路 敦, 2004. 手早くレイク角を測定する2種類の器具の紹介. 構造地質, **48**, 23-24.

国際会議での口頭発表

- (1) Yamaji, A., Sakai, T., Arai, K. and Okamura, Y., 2002. Variable forearc stress behind the eastern Nankai subduction zone in the last two million years (American Geophysical Union, San Francisco).
- (2) Yamaji, A. and Tomita, S., 2003. Bedding tilt test of paleo-stresses determined from mesoscale faults in a Quaternary fold belt, Central Japan (EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France).
- (3) Yamaji, A., 2003. A new stress inversion technique to determine multiple stresses from heterogeneous faults from future Pannonian-Carpathian projects. (EGS, 4th Stephen Müller Conference, Romania).
- (4) Yamaji, A., 2004. Reconstruction of Quaternary and late Tertiary stresses in Japanese island arcs: method and present status (1st Annual Meeting of Asia-Oceania Geosciences Society, Singapore, Invited).
- (5) Otsubo, M., Hayashi, D., Yamada, S., Matsuda, H. and Yamaji, A.: When did present-day stress start? The case of arc-parallel extension in the southern Ryukyus, Japan (First Annual Meeting of Asia-Oceania Geosciences Society, Singapore).
- (6) Yamaji, A., 2004. Unfolding the multi-inverse method (Tectonic Studies Group Meeting, Geological Society, London).
- (7) Yamaji, A., 2004. Software suite for the multi-inverse method (Tectonic Studies Group Meeting, Geological Society, London).
- (8) Otsubo, M., Sato, K. and Yamaji, A., 2004. Computerized identification of stresses with multi-inverse method combined with k-means clustering (Tectonic Studies Group Meeting, Geological Society, London).
- (9) Otsubo, M. and Yamaji, A., 2004. Bedding tilt test for paleostress analysis by K-means

clustering combined with the multi-inverse method (Tectonic Studies Group Meeting, Geological Society, London).

- (10) Sato, K. and Yamaji, A., 2004. Embedding stress difference in σ -space: a theoretical basis for stress inversion (Tectonic Studies Group Meeting, Geological Society, London).
- (11) Sato, K. and Yamaji, A., 2004. Uniform computational mesh for the improvement of the resolution and efficiency of stress tensor inversion (Tectonic Studies Group Meeting, Geological Society, London).

国内での口頭発表

- (1) 山路 敦, 2002. 京都式応力テンソルインバージョン(小断層解析) (合同学会, 東京).
- (2) 山路 敦・富田 智・森 淳夫, 2002. 月のテクトニクス: 構造地質学的課題 (合同学会, 東京).
- (3) 小林博文・山路 敦, 2002. 能登半島北西部下部中新統から検出された応力 (地質学会, 新潟大学).
- (4) 山路 敦・酒井哲弥・荒井晃作・岡村行信, 2002. 東海地域前弧の応力場変遷 (地質学会, 新潟大学).
- (5) 戸村元史・山路 敦・伊藤谷生, 2002. 房総半島南端更新統中部(千倉層群最上部)から検出された応力 (地質学会, 新潟大学).
- (6) 山路 敦, 2002. 宮崎地域の応力場変遷: 宮崎層群を切る地質断層からの知見 (地震学会, パシフィコ横浜).
- (7) 山路 敦, 2003. 新潟褶曲帯にみられる褶曲成長に不調和だが流体上昇に有利な応力 (石油技術協会, 石油公団).
- (8) 大坪 誠・山路 敦, 2003. 新潟県西山および中央油帯地域における小断層解析 (地質学会, 静岡大学).
- (9) 山路 敦, 2004. 手早くレイク角を測定する2種類の器具の紹介 (構造地質研究会, 神戸大学).
- (10) 小林博文・山路 敦, 2004. 能登半島北西部輪島地域における前期中新世の伸張テクトニクス (構造地質研究会, 神戸大学).
- (11) 大坪 誠・山路 敦, 2004. 南琉球弧, 上部更新統琉球層群における小断層解析—現在の応力場はいつまでさかのぼれるか? (構造地質研究会, 神戸大学).
- (12) 山路 敦・大坪 誠, 2004. 傾動した岩体で小断層群から古応力をいかに推定するか (合同学会, 東京).
- (13) 大坪 誠・山路 敦, 2004. 褶曲帯における小断層を用いた古応力復元 (合同学会, 東京).
- (14) 佐藤活志・山路 敦, 2004. 応力テンソルインバージョンのための一様計算メッシ

(15) 小林博文・山路 敦・増田富士雄: 能登半島北西部輪島地域における中新統の層序・堆積環境・テクトニクス, 日本地質学会近畿・四国・西日本支部合同例会, 京都大学, 2004 年 6 月 5 日.

(17) 大坪 誠・佐藤活志・山路 敦, 2004. 不均一な断層データから複数の応力を自動分離する方法 (地質学会, 千葉大学).

(19) 山路 敦, 2004, 新しい歪み解析 (地質学会, 千葉大学).

公開した多量データソフトウェアの
付 録
マニュアル（英語版・日本語版）

Multiple Inverse Method Software Package User's Guide

公開した多重逆解法ソフトウェアの
マニュアル（英語版・日本語版）

September 27, 2004

Multiple Inverse Method Software Package User's Guide

Atsushi YAMAJI and Katsushi SATO

Division of Earth & Planetary Sciences
Kyoto University

1.1 File name	4
1.2 Job name	5
1.3 Directory	5
1.4 Window name	8
2. Starting of the program	9
3. Directions and known bugs	9
4.2- For parameter	9
5. Future versions	9
Appendices	9
A. Data format	9
B. Mechanism of the multiple inverse method	10
C. Output efficiency	11
D. Average and standard of selected stress tensor	12
References	13
Index	17

Introduction

Contents

1	Introduction	1
2	Installation	1
3	Main processor	1
4	Post processor	2
4.1	Basic operations	2
4.2	Visualization	2
4.3	Menu items	4
4.3.1	File menu	4
4.3.2	Edit menu	5
4.3.3	Stress menu	5
4.3.4	Window menu	8
4.3.5	Help menu	9
5	Sorting of faults	9
6	Directions and known bugs	9
6.1	Main processor	9
6.2	Post processor	9
7	Future versions	9
Appendices		9
A	Data format	9
B	Mechanics of the multiple inverse method	10
C	Stress difference	11
D	Average and spread of reduced stress tensors	12
References		12
Index		13

Copyright

Multi-inverse method software package

© 2004 Atsushi Yamaji

All rights reserved

Disclaimer of warranty

This software package is free. Free of charge software is provided on an "AS IS" basis, without warranty of any kind, including limitation the warranties of merchantability, fitness for a particular purpose and non-infringement. The entire risk as to the quality and performance of the software is borne by you. Should the software prove defective, you assume the entire cost of any service and repair.

1 Introduction

The multiple inverse method¹ is a numerical technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data [14]. This document describes how to use the software that implements the method for the Windows operating system.

Stress tensor inversion is an inverse method for determining stresses from fault-slip data obtained from outcrops, borehole cores or active seismic clusters [2, 9]. Among those numerical techniques the multiple inverse method is designed specifically to separate stresses from such a fault assemblage of which parts were activated by different stresses [14]. Those data are called heterogeneous. The software is a tool to investigate the spatial and/or temporal variations of (paleo)stress.

The software consists of the main and post processors. Full use of the programs enables not only to separate stresses from heterogeneous fault-slip data, but to investigate the responsibility of the stresses to each of the fault. Consequently, faults are sorted by the responsible stresses. This fault sorting is an important function of the post processor². If some faults are observed to cut other faults at an outcrop, we are able to determine the order of faulting of them. And, we can estimate the order of the stresses that are thought to be responsible for the faults. Otsubo et al. [5] use such a technique to study the stress history of an area. The multiple inverse method can be used to study paleo-stresses in folded sedimentary rocks or tilted rock masses with the bedding tilt test of stresses [16].

The principle of the multiple inverse method is described in [14] and Appendix B of this document³.

2 Installation

This is the minimal system configuration required to use this software package:

- Pentium (200 MHz).
- 128 MB RAM.
- 10 MB free disk space.
- Windows XP/ME/2000/98/NT4.0 operating system.

It is very easy to install the main and post processors in your computer, as the installation does not alter the registry

¹Several articles of the authors used the name "multi-inverse method", which is synonymous with the multiple inverse method.

²See §4.3.3 for details.

³If the number of faults is small, say less than ten, the Ginkgo method is an option to investigate possible stresses compatible to given heterogeneous fault-slip data [15]. The method is a kind of "colored dihedral method", and its free software is not included in this software package but is available from the author's web page.

of the Windows operating system. All the software components are available from the site

<http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~yamaji/PDS/indexe.html>

Download the compressed file "mim4.zip" and expand them in a folder in your computer to complete the installation. Now, you can use the software. The files "mim4.exe" and "miv4.exe" are the executable files of the main and post processors⁴.

3 Main processor

The main processor "mim4.exe" is a console program (Figure 1). The software read a data file with the FDT format⁵, and output the result in an other text file, of which contents are visualized by the post processor.

Follow the steps below to use the main processor.

1. As soon as the executable file is double-clicked, an open dialog pops up to prompt the user to select a data file. Choose an appropriate data file.
2. Specify an output file name through a save dialog. The program appends automatically the file extension ".mi4". If you specify an existing file, you should answer yes or no on a console window to confirm the overwriting.
3. Input the number k through the console window. The program accept an integer in the range $2 \leq k \leq 8$, but $k = 4$ or 5 is recommended for many cases.

Once the parameter is input, the program starts calculation. The lines "Input : sampledata" and "Output : test" indicate that the data file is "sampledata.fdt" and the results are stored in the file "test.mi4". The console window closes when the computation is completed.

The time of computation depends on N and k , and on the power of your computer. The program iterates stress inversion many times. The number of iteration equals the binomial coefficient

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

Figure 2 shows the time and computer memory needed for processing.

The fractional number "1000/2002" in Figure 1 reports the status of the computation. The denominator equals ${}_N C_k$,

⁴It is possible to launch the executable files from the "Start" menu. Consult the Help of the operating system for the procedure to register the executable files to the menu.

⁵See Appendix A for this format.


```

D:\Development\Hybrid\MIM4\MIM40_package\mim4.exe
*****
*
*   Multiple Inverse Method
*
*   Main Processor, Version 4.01
*
*   Produced by A. Yamaji and K. Sato
*   Division of Earth & Planetary Sciences, Kyoto University
*
*****

K < 2..8> = 5
Input : sampledata.fot
Output : test.m14

* Initialization 1 2 *
* Initialization 2 2 *
*   Main Loop   *
    1000       2002

```

Figure 1: Console window of the main processor.

and the numerator indicates the number of completed iterations.

The present version of the main processor has the limitation ${}_NC_k < 2,147,483,647$, because the program uses 32-bit signed integers to count the iterations. This limitation will be removed in a future version of this main processor by utilizing 64-bit ones. If N is large, specify a smaller k not to exceed the limitation.

4 Post processor

4.1 Basic operations

The post processor has many functions, among which the main one is to visualize the result of the computation by the main processor. In this section, the procedure for the visualization is briefly explained. Other functions are introduced in §4.3.

The post processor has the name “MI Viewer”, and has the executable file “miv4.exe”. The program has the main and data windows: the main window has the name “MI Viewer” on its title bar (Figure 3), and the other has the title “Fault-Slip Data” (Figure 4).

When the post processor is launched, the main window lies on the data window. Choose items in the “Window” menu on the main window or type **Alt+W** on the keyboard to bring the data window on the main one.

Follow the steps below for the visualization.

1. Run the executable file.
2. Choose one of the files that were output by the main processor by clicking the “File” menu and then the “Open” submenu on the main window. An open dialogue opens by these operations. If the file is loaded, the fault-slip data contained in the file are shown on the data window.
3. Click the “Draw” button on the main window, then the result of the multiple inverse method applied to the fault-slip data is visualized on the paired stereograms on the main window (Figure 3).
4. Click the “File” menu and click the menu item “Exit” to terminate the program.

4.2 Visualization

Main window The paired stereograms on the main window show the principal orientations of stresses by lower-hemisphere, equal-area projection (Figure 3). Each of the symbols that have heads and tails like tadpoles plotted on the stereograms represents a state of stress⁶. In what follows, we use the term “tadpole symbol”. The color of a symbol denotes the stress ratio

$$\Phi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (0 \leq \Phi \leq 1).$$

⁶The term “state of stress” is defined in Appendix C.

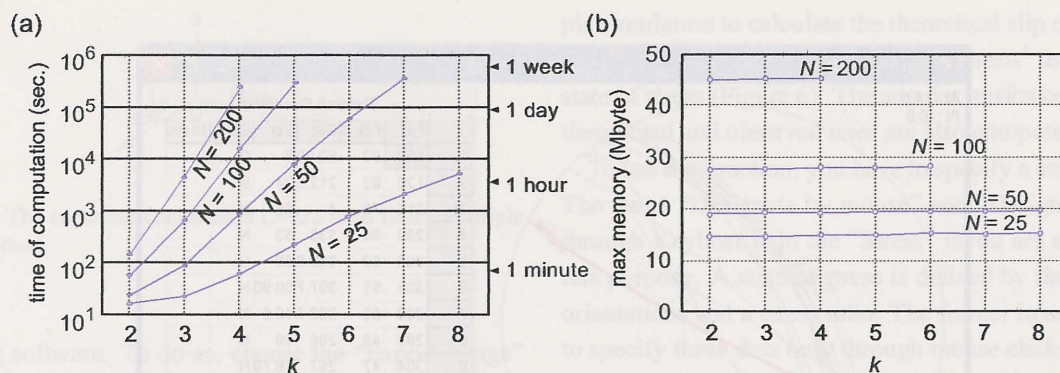


Figure 2: Time of computation and memory needed by the main processor for calculation. The data shown here were measured with a personal computer (Pentium II, 300 MHz, 128 M bytes of memory).

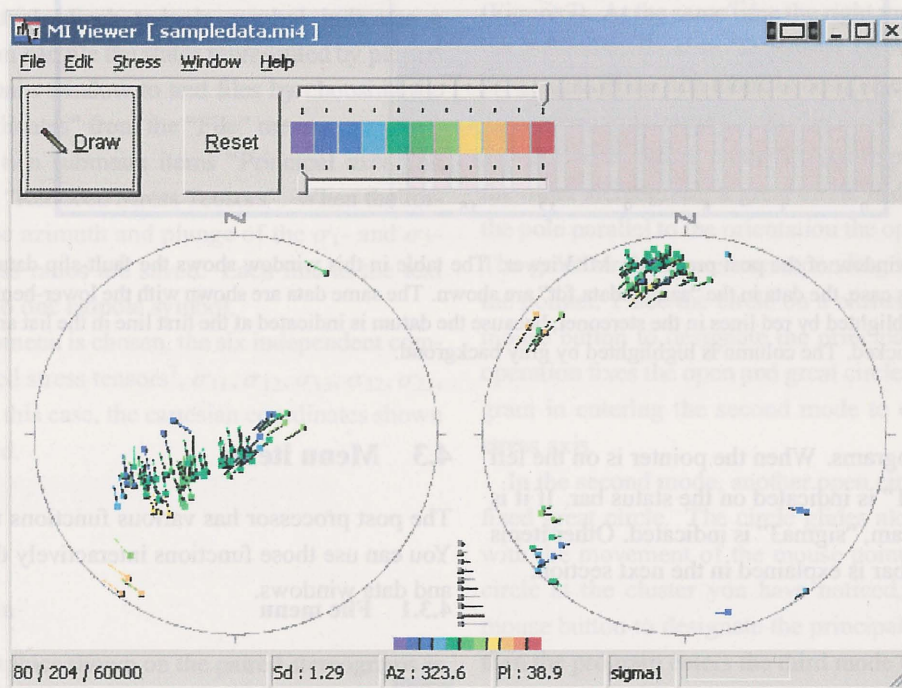


Figure 3: The main window of the post processor, MI Viewer, visualizing the content of the file "sampledata.mi4", which the main processor output from the "sampledata.fdt" included in this software package with the parameter $k = 5$.

We use the sign convention that compression is positive and $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$.

Values of this ratio are indicated by 11 colors with an interval of 0.1. There are color bars just below the menu bar and under the stereograms. The color scheme can be freely changed, but the violet and red indicate $\Phi = 0$ and 1, respectively, in Figure 3. And, for example, $\Phi = 0.2$ is represented by the third color from the left in the color bar.

Clusters of the tadpole symbols with the same color and same orientation and length of tails represent significant stresses for a given set of fault-slip data. A tadpole symbol represents a state of stress. On the left stereogram, position of the head of a tadpole symbol indicate a σ_1 orientation,

and the azimuth and plunge of the σ_3 orientation is designated by its tail. The length of a tail is drawn proportional to the remainder ($90^\circ - \text{plunge}$). The steeper the σ_3 -axis, the shorter the tail is. The correspondence between the length and plunge is shown by the ten gray tadpole symbols plotted between the stereograms, where the tadpoles with the longest and shortest tails indicate plunges at 0° and 90° .

The role of the head and tail is inverted on the right stereogram. That is, the position of the head of a tadpole symbol on the stereogram indicates the σ_3 orientation.

The two values after "Az : " and "Pl : " in the status bar at the base of the main window (Figure 3) show the azimuth and plunge of the orientation of the position of the mouse

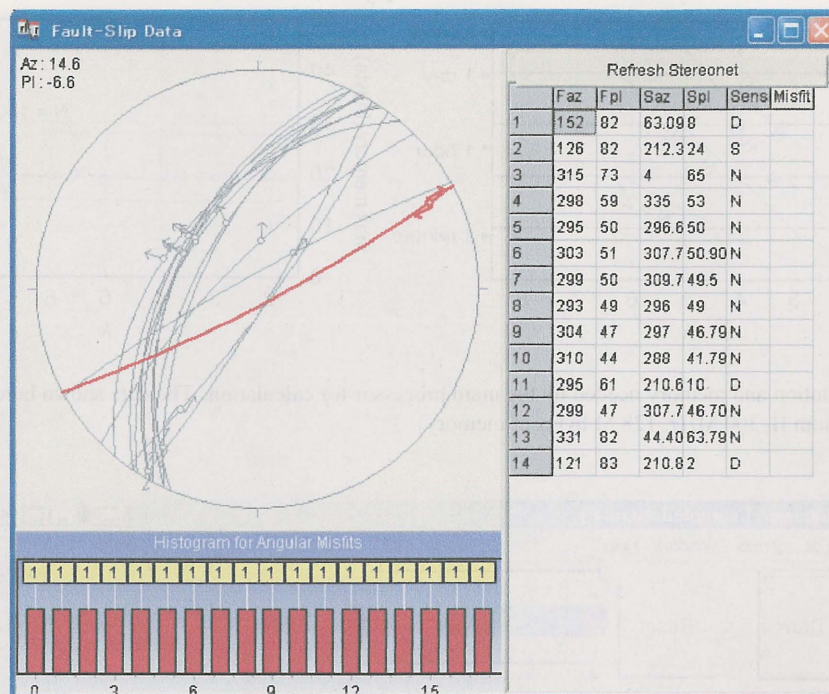


Figure 4: The data window of the post processor, MI Viewer. The table in this window shows the fault-slip data processed by the present method. In this case, the data in the "sampledata.fdt" are shown. The same data are shown with the lower-hemisphere stereonet. One fault datum is highlighted by red lines in the stereonet, because the datum is indicated at the first line in the list and the first column of the line had been clicked. The column is highlighted by gray background.

pointer on the stereograms. When the pointer is on the left stereogram, "sigma1" is indicated on the status bar. If it is on the right stereogram, "sigma3" is indicated. Other items shown in the status bar is explained in the next section.

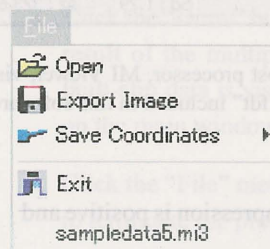
Data window The data window has three panels (Figure 4). Fault-slip data are shown in the stereonet occupying the upper left panel, and listed in the right panel in the FDT format. At the upper left corner of the former panel, the position of the mouse pointer is shown by the azimuth and plunge of the position in the stereonet. The histogram in the lower left panel shows the frequency of the angular misfits between observed and theoretical slip directions of the faults. The latter directions are calculated with a state of stress designated on the main window. The usage of this histogram is explained in the next subsection.

If a line in the list is clicked, the corresponding fault is highlighted by red lines on the stereonet. Just before the graphics shown in Figure 4 was captured, the first datum in the list had been clicked. It is easy to see the correspondence between plotted symbols in the stereonet and data in the list. The button "Refresh Stereonet" is to switch off the highlight.

4.3 Menu items

The post processor has various functions to help analysis. You can use those functions interactively through the main and data windows.

4.3.1 File menu



First time you run the post processor, the last item in the "File" menu is "Exit". If a file is loaded, the file name is automatically recorded in the text file "prevfiles.txt", which is stored in the home directory of the post processor. Next time you run the program, the file names are appended below the "Exit" as dynamically created menu items, with which you can access to the files.

[Export Image] The graphics shown on the main window can be saved as enhanced metafiles with the file extension ".emf". You can decorate or modify the files with

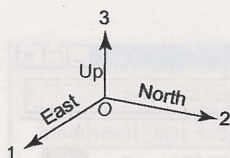


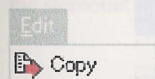
Figure 5: The cartesian coordinates O-123 used in the multiple inverse method.

a drawing software. To do so, choose the "Export Image" from the "File" menu, then a save dialogue appears. The graphics can be saved as JPEG images, also. You have the option on a save dialogue.

[Save Coordinates] Each tadpole symbol indicates a state of stress. You can file the states represented by plotted symbols in the main window to text files by choosing the item "Save Coordinates" from the "File" menu.

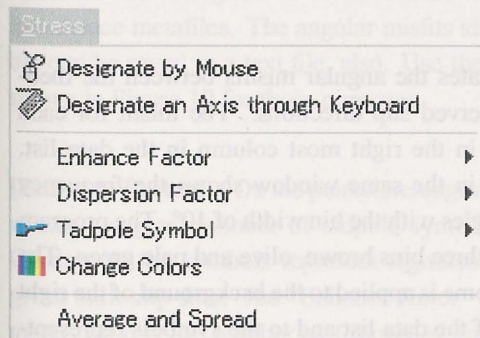
The item has two submenu items "Principal axes and stress ratios" and "Reduced Stress Tensors". When the former is chosen, the azimuth and plunge of the σ_1 - and σ_3 -axes and the stress ratios are saved. Each line in the text file corresponds to one tadpole symbol.

If the latter submenu is chosen, the six independent components of reduced stress tensors⁷, σ_{11} , σ_{12} , σ_{13} , σ_{22} , σ_{23} , σ_{33} are saved. In this case, the cartesian coordinates shown in Figure 5 is used.



4.3.2 Edit menu

[Copy] The graphics shown on the paired stereograms is stored in the clipboard by choosing the "Copy" item from the "Edit" menu. You can edit the picture with a drawing software.



4.3.3 Stress menu

[Designate by mouse] and [Designate an axis through keyboard] The post processor has the function of a sim-

ple simulation to calculate the theoretical slip directions of faults based on the Wallace-Bott hypothesis⁸ for a specified state of stress (Figure 6). The angular misfits between their theoretical and observed ones are also computed.

To use the function, you have to specify a state of stress. The items "Designate by mouse" and "Designate an Axis through Keyboard" in the "Stress" menu are available for this purpose. A state of stress is defined by the σ_1 and σ_3 orientations and a stress ratio. The former item allows you to specify these data only through mouse clicks. The other item prompts you to input one of the orientations through the keyboard.

If the former item is chosen, the tip of the mouse pointer is encircled when the pointer is on the paired stereograms (Figure 7). At the same time the right most box in the status bar is filled by the sign "Designate 1st Axis", indicating the program is in the first mode to designate the first stress axis. The open circle moves with the tip of the mouse pointer. The pointer is placed on the left stereogram in Figure 7. On the other stereogram, a great circle is drawn so as to have the pole parallel to the orientation the open circle indicates. The great circle moves corresponding to the movement of the pointer. Place the circle on a cluster, then click the left mouse button to designate the principal orientation. This operation fixes the open and great circles, and cues the program in entering the second mode to designate the other stress axis.

In the second mode, another open circle is drawn on the fixed great circle. The circle glides along the great circle with the movement of the mouse pointer. Place the open circle at the cluster you have noticed, and click the left mouse button to designate the principal orientation. Then, then the program enters the third mode to receive the stress ratio.

You can designate the stress ratio by clicking one of the color boxes above the paired stereogram. The click terminate all the modes to designate a state of stress, and cue the post processor to calculate the theoretical slip directions of the faults under the state of stress just you have specified.

If the option "Designate an Axis through Keyboard" is chosen, the post processor receives the first stress axes through the yellow panel shown in Figure 8. Input the azimuth and plunge of the σ_1 - or σ_3 -axis, and push the "Confirm Parameters" button to terminate the first mode. The other stress axis and stress ratio are designated by the same steps with those described above.

As soon as the designation of a state of stress is completed, the post processor calculates the theoretical slip directions of the faults, and plot the directions on the stereonet in the data window (Figure 6). At the same time the

⁷See Appendix C for the explanation of the reduced stress tensors.

⁸See Appendix B for this hypothesis.

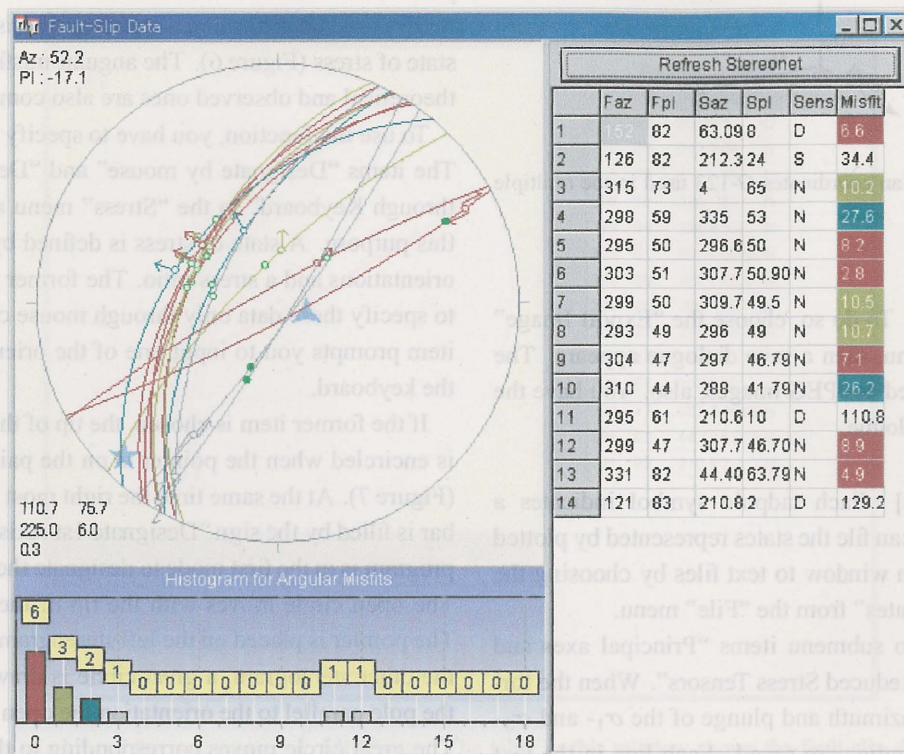


Figure 6: Data window showing the sample data attached with this software package and their theoretical slip directions under the state of stress that has the stress ratio $\Phi = 0.3$ and the σ_1 and σ_3 orientations indicated by the symbols $\blacktriangle$ and $\blackstar$, respectively, on the stereonet. The orientations and the stress ratio are shown by their azimuths and plunges at the lower left of the stereonet.

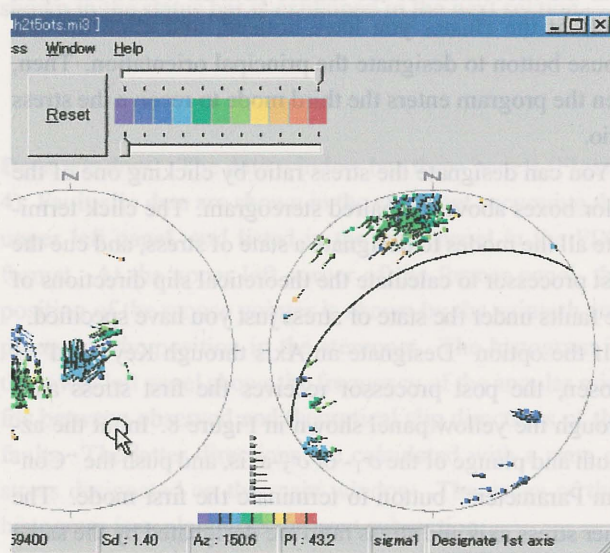


Figure 7: Part of the main window when it is in the first of three modes to designate a state of stress. The first mode is defined to designate one of the stress axes.

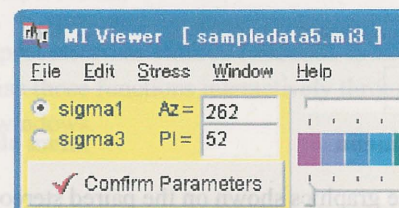


Figure 8: A principal orientation can be input from keyboard using this panel.

program calculates the angular misfits between the theoretical and observed slip directions. The misfit for each fault is shown in the right most column in the data list. The histogram in the same window shows the frequency of the misfit angles with the bin width of 10° . The program paints the first three bins brown, olive and pale green. The same color scheme is applied to the background of the right most column of the data list and to the symbols representing faults.

The misfit angles are graphically shown also by the tangent-lineation diagram of the fault-slip data (Figure 9). In the diagram, a fault-slip datum is represented by a small arrow plotted on a stereonet. The position of the arrow in the diagram indicate the pole to the fault plane, and the ar-

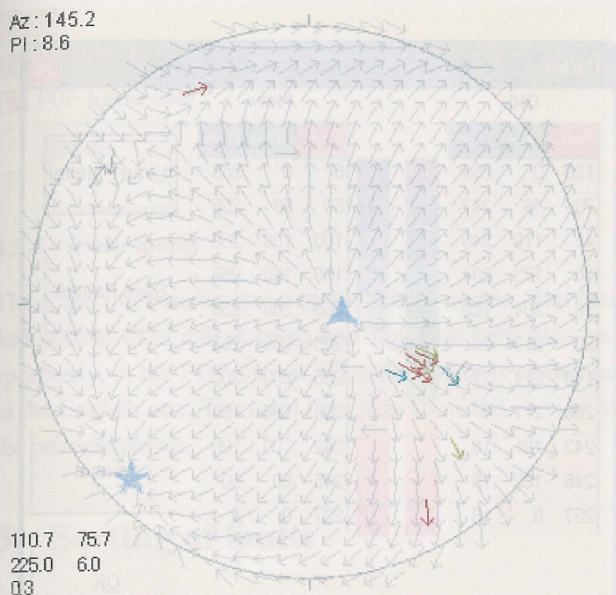


Figure 9: Tangent-lineation diagram of the same data with Figure 6.

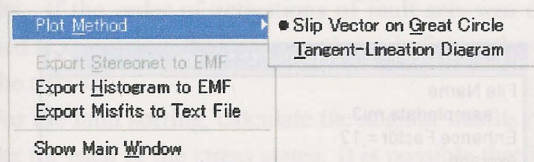


Figure 10: Items in the pop-up menu shown by a right-click on the stereonet in the data window.

row points the slip direction of the footwall block [13]. A lot of right gray arrows make an array on Figure 9 to show theoretical slip directions. You can choose the expressions in Figures 6 and 9 through the pop-up menu shown in Figure 10.

The results of the simulation that are illustrated on the stereonet and histogram on the data window can be saved in enhance metafiles. The angular misfits shown in the table can be saved in a text file, also. Use the pop-up menu shown in Figure 10 for those purposes.

[Enhance Factor] On the paired stereograms in the main window, a great number of tadpole symbols are plotted. Clusters of the symbols represent significant stresses for given fault-slip data. The "Enhance factor" in the "Stress" menu controls the number as follows in order to enhance the clusters.

The main processor conduct stress inversion for the entire k -element subsets from the number of N faults, so that we have $N C_k$ optimal stresses. The multiple inverse method uses a computational grid which includes $N_G = 60,000$ grid

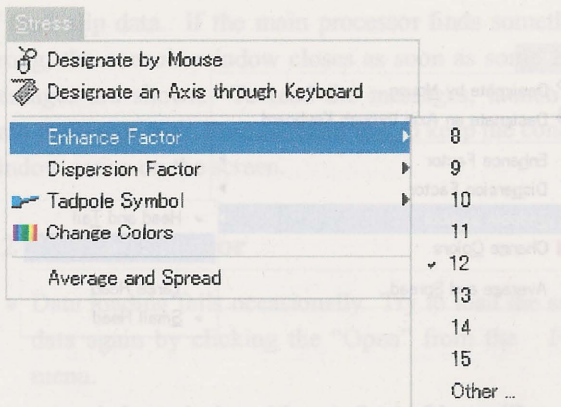


Figure 11: Enhance factor e can be changed through this menu.

points. The optimal stresses are approximated by the nearest grid points, so that let $m^{(i)}$ be the number of optimal stresses tied to the i th grid point. The post processor plots a number of $m^{(i)} / \max(es, 1)$ tadpole symbols on the paired stereograms, where e is the enhance factor that you can change its value from the "Stress" menu, and s is the standard deviation defined by

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

and

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

The default value of e is set at 12, but can be an arbitrary integer in the range $0 \leq e \leq 99$. You can choose the integers from the menu item shown in Figure 11. The standard deviation is shown in the middle of the status bar with the prefix "Sd :". For example, the standard deviation is 1.29 for the case of Figure 3.

Since the denominator of the fraction $m^{(i)} / \max(es, 1)$ is greater than or equal to the unity, this fraction is smaller or equal to $m^{(i)}$. Accordingly, the tadpole symbols are thinned out by this division to enhance clusters⁹. The total number of tadpoles plotted on each stereograms is

$$N_p = \frac{m^{(1)} + \dots + m^{(N_G)}}{\max(es, 1)}.$$

The left most section in the status bar shows three numbers, N_p , number of grid points with $m^{(i)} > 0$ and N_G , which are separated by slashes.

⁹This enhancing technique is simple, but the fact is that it spoils the resolution of the multiple inverse method. The clusters should be identified without the thinning with the enhance factor. For this purpose, it is necessary to find out clusters in the parameter space. We have tested some techniques [6]. A future version of this software suite shall implement artificial intelligence techniques for clustering in a high dimensional parameter space.

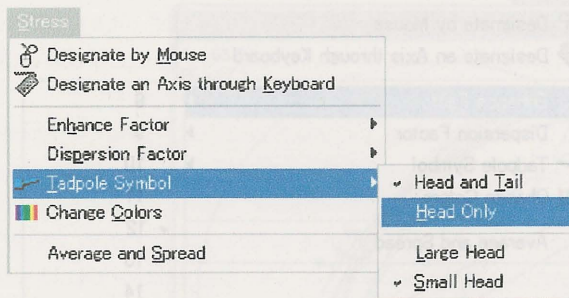


Figure 12: Attributes of the tadpole symbols.

[Dispersion Factor] It is not easy to see each tadpole symbols in a high density cluster, because the symbols lie one above another. In that case, the cluster can be dispersed around its center by choosing a larger “Dispersion Factor” from the “Stress” menu. The default value of the factor is 2, and can be an integer between 0 and 3. If it is set at zero, the symbols are plotted just at the points on the stereograms corresponding to the computational grid points.

[Tadpole Symbol] Other than colors, the tadpole symbols have several attributes. The tails help users to see the correspondence between the clusters in the left and right stereograms, but the tails are not necessary in some purposes. The tadpole symbols have two size, large and small. Large ones may look nice for publication purposes. These options can be chosen from the menu item “Tadpole Symbol” shown in Figure 12.

[Change colors] The color scheme for stress ratios can be changed by clicking the “Change Colors” from the “Stress” menu. The dialogue in Figure 13 appears on the screen to show color palettes. The colors are indicated by their RGB values between 0 and 255. There are two color columns in the dialogue box. The left and right ones show the old and new color palettes, respectively. Click a color box in the right column to change the color. The palettes have 11 colors. You can save the RGB values in a text file with the extension “.pal” by clicking the “Save Palette” button on the dialogue. We call such a file as a palette file. You can load a palette file by clicking the “Load Palette” button.

[Average and Spread] Choosing this item from the “Stress” menu, the statistical parameters of the plotted stress states are shown on a dialogue box (Figure 14). The values indicated under the item “Average” are the principal orientations and stress ratio of the average state of stress for the plotted ones. The “mean stress difference” indicates the spread of the tadpole symbols. See Appendix D for the

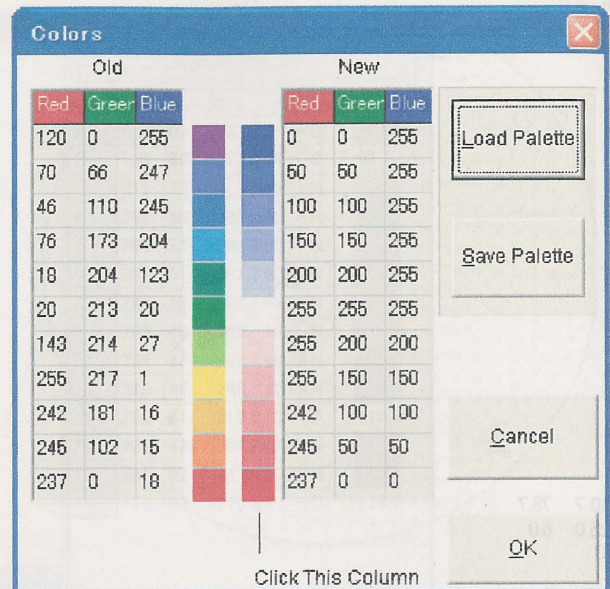


Figure 13: The color scheme to indicate stress ratios can be changed through this dialogue.

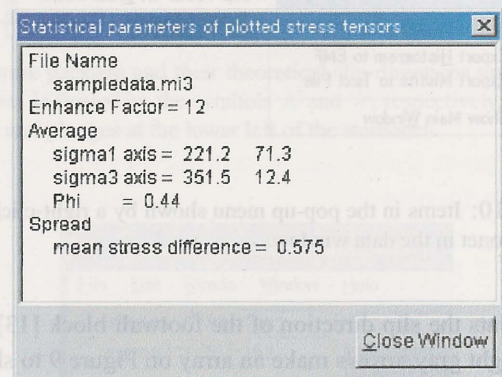
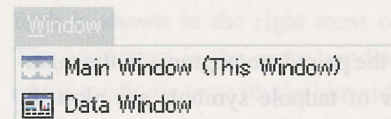


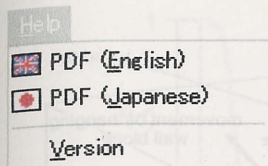
Figure 14: Dialogue box showing statistical parameters of the stress states plotted as the tadpole symbols on the paired stereograms.

details of the average state of stress and the mean stress difference.



4.3.4 Window menu

You can choose to put the main window on the data window or vice versa by clicking the “Window” menu. The menu item is included in the menu bar on the main window. When the main window is hidden by the data window, you can switch the windows by typing **Alt + W** on your keyboard.



4.3.5 Help menu

There are three menu items in the "Help" menu. The first and second ones call English and Japanese help files, respectively, in the PDF format. This document is contained in the English one. The third item is to show the version of the post processor.

5 Sorting of faults

Given heterogeneous fault-slip data, stress states that are compatible with the data are represented by clusters in the paired stereograms. You may want to know the correspondence between the stresses represented by the clusters and faults. If the order of activations of fault sets was determined at an outcrop, the correspondence indicates the order of the stresses.

For the fault sorting, calculate the angular misfits of the faults for each of the stress states. It is possible that faults with the small misfit angles were activated by the designated stress. The histograms in Figures 6 and 9 indicate that there are two outliers with misfits greater than 90°. This is the evidence that the two faults are incompatible with the designated stress state and that the stress was not responsible with the faults.

On the other hand, the tangent-lineation diagram in Figure 9 indicates that many of the given faults are parallel to the principal stress planes, which are defined by two principal stress axes. Those faults were difficult to be activated by the stress, unless their friction coefficient was very low when they moved. The proximity of the fault and principal stress planes indicates low slip tendency of the faults [3].

Stress inversion is based on the Wallace-Bott hypothesis (Appendix B), saying that faults with the same attitude and the same slip direction can be activated by different stresses. Therefore, the fault sorting that we can do only from those fault-slip data has obscurity. The misfit angle and the slip tendency are the fuzzy clues to the sorting.

6 Directions and known bugs

6.1 Main processor

Avoid characters other than alpha-numeric ASCII characters for the directory names of this software package and

of fault-slip data. If the main processor finds something wrong, the console window closes as soon as some error messages are shown. To read the messages, launch the main processor from the command line to keep the console window active on the screen.

6.2 Post processor

- Data loading fails occasionally. Try to load the same data again by clicking the "Open" from the File menu.
- If the post processor loads data files many times, the program can get hung. In that case, (1) press the keys **Alt+F** and **x** successively to terminate the program, (2) and run the post processor again.

7 Future versions

Improved versions of this software suite will be published. We have projects to improve the resolution of this method and to develop software for the objective identification of clusters without thinning with the enhance factor. For the first purpose, the computational grid is being redesigned [11, 12]. The K-means clustering, an artificial intelligence technique, is adopted to the automatic and objective recognition of clusters in the 6-dimensional parameter space [6]. With this technique, bedding tilt test for paleostress analysis [16] will be also improved [7].

□ Appendix A: Data format

The main processor loads data files only with the "FDT" format, which is explained below. Make a data file with a text editor, spreadsheet or other program with the file extension ".fdt". Each data file is expected to contain a set of data that were collected from one area and/or from one stratigraphic horizon. The data file must be a plain ASCII-text file containing one fault-slip datum per line of the text (Figure 15(a)). We call data files with the FDT format "FDT files".

Data files with the FDT format have the following structures. Every line is composed of four values and one character and, if necessary, remarks. The first and second values are the azimuth and dip of a fault plane, where the azimuth points to the dip direction. The third and fourth values are the azimuth and plunge of fault striations. The character represents the sense of fault movement, and must be one of "N", "R", "D" or "S". These are the initials of normal, reverse, dextral and sinistral faults, respectively. Their lower-case letters are also acceptable. The items in each

(a)

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

f_{az}	f_{pl}	s_{az}	s_{pl}	sense	
----------	----------	----------	----------	-------	--

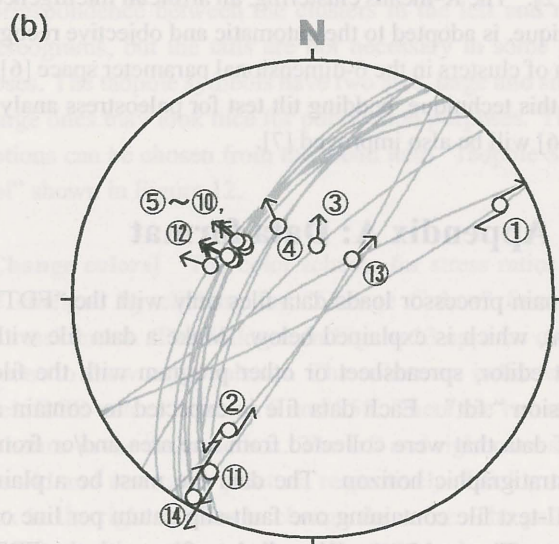


Figure 15: (a) Example of a data file. (b) Fault-slip data listed in (a). Lower-hemisphere, equal-angle projection. Numbers in open circles indicate the line numbers in the list.

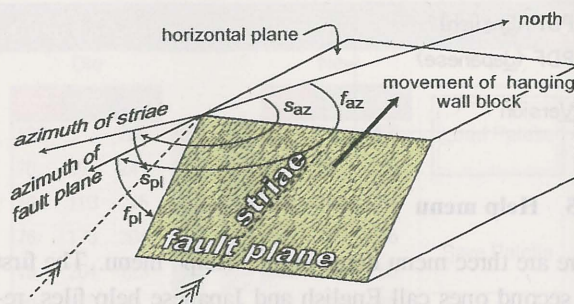


Figure 16: A fault-slip datum in the FDT format consists of four angles f_{az} , f_{pl} , s_{az} , s_{pl} in degrees and the sense of shear.

line must be separated by one or more spaces, and blank lines are not acceptable.

The attitude of a fault plane is designated by the azimuth f_{az} and plunge f_{pl} of the maximum dip direction on the plane (Figure 16). Those of slickenside striations on the plane are indicated by s_{az} and s_{pl} , respectively. All angles are measured in degrees, and may be integers. The azimuths and plunges must be in the range $[0^\circ, 360^\circ]$ and $[0^\circ, 90^\circ]$, respectively. The main processor neglects any words and characters after the fifth item in a line (Figure 15), so that the columns after the character indicating the shear sense can be used for remarks.

It is recommended to check your data file with the stereonet software¹⁰ "SFSA". The Windows software loads data files with the FDT format, and visualizes their contents with a stereonet. You can export the graphics as a metafile to other programs. Figure 15(b) was made with the software.

Appendix B: Mechanism of the multiple inverse method

The mechanism of the multiple inverse method is explained briefly in this appendix. See [14] for details.

Wallace-Bott hypothesis Fault-slip analysis to infer (paleo)stresses including the multiple inverse method is based on the Wallace-Bott hypothesis [2]. That is, although fault planes may of arbitrary orientation, the slickenside striations and the sense of shear indicate the direction of the maximum shear stress on the fault planes. Let σ be the stress tensor that activates a fault with the unit normal $\vec{n}$. Then, we have the traction at the fault surface, $\vec{t} = \sigma \cdot \vec{n}$. The normal and shear components of this vector are $(\vec{n} \cdot \vec{t})\vec{n}$ and

$$\vec{s} = \vec{t} - (\vec{n} \cdot \vec{t})\vec{n}.$$

¹⁰The software SFSA is available also from the author's homepage.

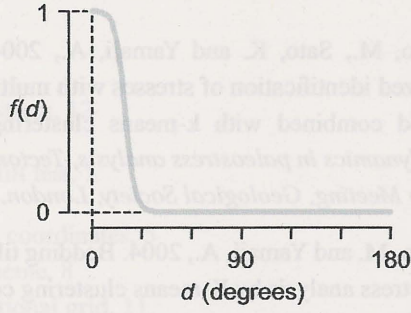


Figure 17: Decreasing function $f(d)$ used in the multiple inverse method.

respectively. Therefore, we have the shear stress

$$\vec{s} = \sigma \cdot \vec{n} - (\vec{n} \cdot \sigma \cdot \vec{n}) \vec{n}. \quad (1)$$

Note that faulting is thought to occur to relieve this shear stress. Consequently, the Wallace-Bott hypothesis says that a fault slip is parallel to the direction of $-\vec{s}$. Assuming a stress tensor σ , we can calculate the theoretical slip direction with Eq. (1).

Classic stress inversion Since this direction is a function of $\vec{n}$ and σ (Eq. 1), we can determine σ in the least-square sense. In this inversion, the objective function to be minimized is

$$S = f(d^{(1)}) + \dots + f(d^{(N)}), \quad (2)$$

where $d^{(i)}$ is the angular misfit between the observed and theoretical slip directions of the i th fault, and N is the number of faults, and $f(\cdot)$ is a decreasing function [1]. Figure 17 shows the graph of the function the main processor uses.

This inverse method uses the attitudes of fault planes, the orientations of striations and slip senses. These are called fault-slip data. As these are non-dimensional quantities, the stress components cannot be determined but the optimal principal orientations and stress ratio are determined.

The multiple inverse method This method was designed specifically to separate stresses from heterogeneous fault-slip data¹¹. Faults are usually sorted into homogeneous groups on the basis of apparent relative chronology. However, the fault sorting is usually difficult. The method is a numerical technique to separate stresses from heterogeneous data.

The optimal stress determined by the stress inversion is represented by a point in four-dimensional parameter space, because the principal stress orientations are represented by three Euler angles and the stress ratio is the

¹¹A set of fault-slip data is called heterogeneous, if multiple stresses were responsible for the fault movements.

remaining parameter. The present method uses computational grid distributed in the parameter space.

The method firstly makes k -element subsets from N faults¹². The number of the subsets is ${}_N C_k$. The classic stress inversion is applied to all the subsets, so that we obtain a great number of optimal stresses, each of which are represented by a point in the parameter space. Significant stresses are, consequently, represented by the clusters of the points. It is assumed that the stresses vote to their nearest grid points. The integer $m^{(i)}$ defined in §4.3.3 is the score that the i th grid point polls.

□ Appendix C: Stress difference

In this document, we assume that stress tensors with the same principal orientations and the same stress ratio represent the same state of stress. In other words, we define the state of stress by those stresses.

Given two states of stress that are represented by the tensors $\bar{\sigma}_{ij}^{(1)}$ and $\bar{\sigma}_{ij}^{(2)}$, their difference is quantified by stress difference D [4], where

$$D = \frac{1}{3} \left\{ (\Delta_{11} - \Delta_{22})^2 + (\Delta_{22} - \Delta_{33})^2 + (\Delta_{33} - \Delta_{11})^2 + 6(\Delta_{12})^2 + 6(\Delta_{23})^2 + 6(\Delta_{32})^2 \right\}^{\frac{1}{2}},$$

and $\Delta_{ij} = (\bar{\sigma}_{ij}^{(1)} - \bar{\sigma}_{ij}^{(2)})$, and $\bar{\sigma}_{ij}$ is the stress tensor that is normalized so as to satisfy the two conditions, $\bar{\sigma}_{11} + \bar{\sigma}_{22} + \bar{\sigma}_{33} = 0$ and

$$\sigma_S^{\text{oct}} = \frac{1}{3} \left\{ (\bar{\sigma}_{11} - \bar{\sigma}_{22})^2 + (\bar{\sigma}_{22} - \bar{\sigma}_{33})^2 + (\bar{\sigma}_{33} - \bar{\sigma}_{11})^2 + 6(\bar{\sigma}_{12})^2 + 6(\bar{\sigma}_{23})^2 + 6(\bar{\sigma}_{32})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = 1. \quad (3)$$

The left-hand side of the last equation is the octahedral shear stress of $\bar{\sigma}_{ij}$. Normalized stress tensors are also called reduced stress tensors.

The Wallace-Bott hypothesis predicts the same slip direction for any fault under the stresses with the same normalized ones. If $D = 0$, two stresses have the same state of stress, and cause the same fault activity. The larger the stress difference the greater the difference between slip directions under two stresses becomes. If two stresses result always in opposite slip directions for any fault, then they are called inverse stresses and $D = 2$. It is seen that $0 \leq D \leq 2$ [4].

¹²The main processor accepts an integer in the range [2, 8] for the combination number k . The stress inversion is an evenly determined and over determined inverse problems if $k = 4$ and > 4 , respectively. The choice of k is arbitrary for the present method, but we recommend $k = 5$ for many cases.

□ Appendix D: Average and spread of normalized stresses

The average stress that is shown in Figure 14 is defined as follows. Let $\bar{\sigma}^{(1)}, \dots, \bar{\sigma}^{(N)}$ be the normalized stress tensors that are plotted as tadpole symbols on the paired stereograms. The average stress is defined by the equation¹³,

$$\langle \sigma \rangle = \frac{1}{N} [\bar{\sigma}^{(1)} + \dots + \bar{\sigma}^{(N)}],$$

which is the component-size average of the normalized stress tensors. The azimuth and plunge of the principal orientations of this average and the stress ratio

$$\langle \Phi \rangle = \frac{\langle \sigma \rangle_2 - \langle \sigma \rangle_3}{\langle \sigma \rangle_1 - \langle \sigma \rangle_3}$$

are listed in the dialogue box shown in Figure 14. In this equation, $\langle \sigma \rangle_i$ stands for the i th eigenvalue of the tensor $\langle \sigma \rangle$.

Mean stress difference is a measure of the spread of the stress states, and is defined by the equation [16],

$$\langle D \rangle = \frac{1}{N} [D^{(1)} + \dots + D^{(N)}],$$

where $D^{(i)}$ denotes the stress difference between i th reduced stress tensor and $\langle \sigma \rangle$.

References

- [1] Angelier, J., 1979. Determination of the mean principal stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, **56**, T17–T26.
- [2] Angelier, J., 1994. Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In: Hancock, P. L., ed., *Continental deformation*, Pergamon Press, Oxford, 53–101.
- [3] Morris, A., Ferrill, D.A. and Henderson, D.B., 1996. Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, **24**, 275–278.
- [4] Orife, T. and Lisle, R.J., 2003. Numerical processing of palaeostress results. *Journal of Structural Geology*, **25**, 949–957.
- [5] Otsubo, M., Hayashi, D., Yamaji, A., Yamada, S., Matsuda, T., submitted. Beginning of the present-day stress field after 125 ka in the Southern Ryukyu arc. *Journal of Geophysical Research*.
- [6] Otsubo, M., Sato, K. and Yamaji, A., 2004. Computerized identification of stresses with multi-inverse method combined with k-means clustering. *Proc. New dynamics in paleostress analysis, Tectonic Study Group Meeting, Geological Society, London*.
- [7] Otsubo, M. and Yamaji, A., 2004. Bedding tilt test for paleostress analysis by K-means clustering combined with the multi-inverse method. *Proc. New dynamics in paleostress analysis, Tectonic Study Group Meeting, Geological Society, London*.
- [8] Rakhmanov, E.A., Saff, E.B. and Zhou, Y.M., 1994. Minimal discrete energy on the sphere. *Math. Res. Lett.*, **1**, 647–662.
- [9] Ramsay, J. and Lisle, R.J., 2000. *The techniques of modern structural geology, vol. 3: applications of continuum mechanics in structural geology*. Academic Press, New York.
- [10] Saff, E.B. and Kuijlaars, A.B.J., 1997. Distributing many points on a sphere. *Math. Intelligencer*, **19**, 5–11.
- [11] Sato, K. and Yamaji, A., 2004. Embedding stress difference in σ -space: a theoretical basis for stress inversion. *Proc. New dynamics in paleostress analysis, Tectonic Study Group Meeting, Geological Society, London*.
- [12] Sato, K. and Yamaji, A., 2004. Uniform computational mesh for the improvement of the resolution and efficiency of stress tensor inversion. *Proc. New dynamics in paleostress analysis, Tectonic Study Group Meeting, Geological Society, London*.
- [13] Twiss, R.J. and Moores, E.M., 1992. *Structural Geology*, W.H. Freeman, New York.
- [14] Yamaji, A., 2000. The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, **22**, 441–452.
- [15] Yamaji, A., 2003. Are solutions of stress inversion correct? A new method to visualize their reliability and to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, **25**, 241–252.
- [16] Yamaji, A., Tomita, S. and Otsubo, M., 2005. Bedding tilt test for paleostress analysis. *Journal of Structural Geology*, **27**, 161–170.

¹³Note the difference of this average stress from the well-known mean stress that is defined as the arithmetic mean of the diagonal stress tensor components.

Index

Average stress, 12

Bedding tilt test, 1

Cartesian coordinates, 5

Color scheme, 8

Computational grid, 11

Dispersion factor, 8

Enhance factor, 7

FDT file, 9

FDT format, 9

Heterogeneous fault-slip data, 1

Main processor, 1

Mean stress difference, 12

Normalized stress tensor, 11

Post processor, 2

Reduced stress tensor, 11

Sign convention, 3

State of stress, 11

Stress difference, 11

Stress ratio, 2

Tadpole symbol, 2

Tangent-lineation diagram, 6

2004年11月22日

多重逆解法 ソフトウェアパッケージ

User's Guide

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

目次	1
第1章 多重逆解法の概要	1
第2章 stress difference	15
第3章 応力状態の平均とばらつき	16
参考文献	16
索引	17

- ・本ソフトウェアパッケージを無料で公開します。
- ・本ソフトウェアパッケージの著作権は、作者(山路)が保持します。
- ・本ソフトウェアパッケージの使用にあたって許可は不要です。
- ・本ソフトウェアパッケージに含まれるソフトウェアを使用した文書を公表される際に、関係する文献を引用していただければ幸いです。
- ・本ソフトウェアパッケージの最新バージョンは、作者のホームページで公開しています。
- ・本ソフトウェアパッケージをコピーして配布することは、内容を改変せず、なおかつ無料である限り自由です。
- ・本ソフトウェアパッケージを使用して発生したいかなる損害に対しても、作者はいっさいの責任を負いません。動作無保証です。各自の責任においてご利用ください。

1 イン트로ダクション

多重逆解法は、応力テンソルインバージョンの一種であり、露頭・ボーリングコア・群発地震から得られる断層スリップデータから、それらの断層を動かした応力を推定する数値解法です。応力テンソルインバージョンにも色々な方法がありますが [2, 9], 多重逆解法は不均一なデータから複数の応力を分離することを目的として開発されました [15]。ただし、応力テンソルインバージョンでは、不均一という語を次の意味で使います。すなわち、異なる応力状態のもとで動いた複数の断層から得られる断層スリップデータを不均一であると言います。単一の応力状態で動いた断層群から得られたものなら、均一であると言います^{*1}。この文書の目的は、Windows オペレーティングシステム用に開発した、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、付録 B および文献 [15] をご覧ください。

このソフトウェアパッケージは、メインプロセッサとポストプロセッサとから構成されます。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 (§4.3.3)。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。その実例は、文献 [5] に見られます。また、傾動補正ソフトウェア [13] を併用することにより、褶曲帯など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 [19]。

断層の数が少ない場合、例えば 10 条以下の場合、Ginkgo 法を使うという手もあります。Ginkgo 法は、与えられた (不均一な) 断層スリップデータで、応力状態がどれだけ制約されるかを知るためのグラフィックな方法です [18]、多重逆解法と同じ URL で、Windows 用ソフトウェアが公開されています。

■謝辞 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)(C)14540423) を使用しました。記して感謝の意を表します。

2 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.
- 10 MB 以上の空きディスク容量.
- Windows XP/ME/2000/98/NT4.0.

インストールするときも削除するときも、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たりはしません。パッケージは、次の URL で公開しています：

<http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~yamaji/PDS/index.html>

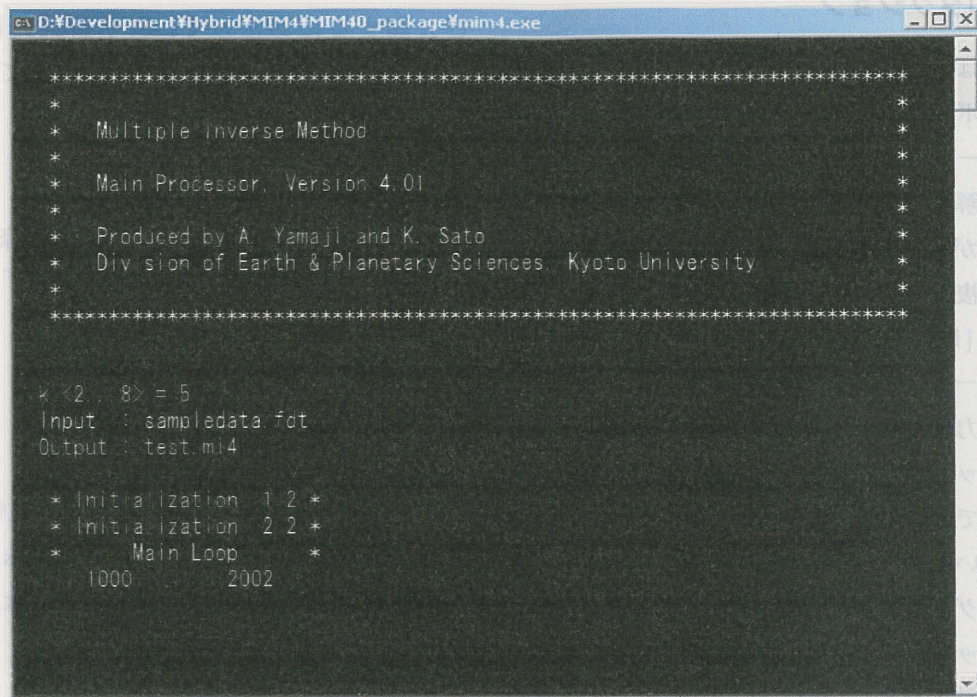
そこから mim4.zip というファイルをダウンロードして、適当なフォルダに展開してください。そうすればもう、多重逆解法ソフトウェアパッケージを使うことができます。2つのファイル mim4.exe および miv4.exe が、それぞれメインプロセッサとポストプロセッサの本体です。通常の Windows ソフトウェア同様、ダブルクリックすることにより、それらを起動することができます。Windows のスタートメニューから起動する設定にすると便利ですが、その設定法については、OS の説明を見てください。

3 メインプロセッサ

メインプロセッサは、FDT 形式の断層スリップデータを読み込み、計算結果をテキストファイルとして出力します。ポストプロセッサはこのファイルを読み込んで、計算結果の可視化などを行います。FDT 形式については、付録 A をご覧ください。

メインプロセッサは、コンソールプログラムであり、mim4.exe を起動すると図 1 のようなウィンドウが現れます。実行ファイル mim4.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

^{*1} 応力状態という語の定義は付録 C を参照。



```
*****
* Multiple Inverse Method
*
* Main Processor, Version 4.01
*
* Produced by A. Yamaji and K. Sato
* Division of Earth & Planetary Sciences, Kyoto University
*
*****

k < 2, 8 > = 5
Input : sampledata.fdt
Output : test.mi4

* Initialization 1 2 *
* Initialization 2 2 *
* Main Loop
1000 2002
```

図1 メインプロセッサの実行画面。

もできます。すなわち、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、ファイル名として cmd として OK ボタンを押すとコンソールウィンドウが現れるので、mim4.exe が置かれているフォルダーにディレクトリを移動して「mim4」とタイプし、Enter キーを押せば起動できます。

メインプロセッサを利用する手続きは、次のようになっています：

1. メインプロセッサは、起動されたなら直ちに FDT 形式のデータファイルを読み込む段階に入ります。Windows の通常のソフトウェアと同じ、ファイル選択画面が現れるので、目的の FDT 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の名前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、実行が中断されます。

3. 次にコンソール画面上で、断層組み合わせ数 k を入力します。「 $k =$ 」という表示につづけて、2 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。断層組み合わせ数は、普通は 5 が適当です。断層数が多ければ、4 でもいいでしょう。

これらの入力操作がすむと、メインプロセッサは計算を開始します。図1の「Input : sampledata」と「Output : test」は、入出力ファイル名を示しています。この場合、sampledata.fdt というファイルをメインプロセッサは読み込んで、計算結果を test.mi4 というファイルに書き出すことを示しています。この図で 1000 / 2002 という分数は、計算がどこまで進展したかを表しています。この場合、 $1000 / 2002 = 49.95\%$ まで計算が終わったという意味です。

計算が終了すると、コンソールウィンドウが自動的に消えます。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ません。

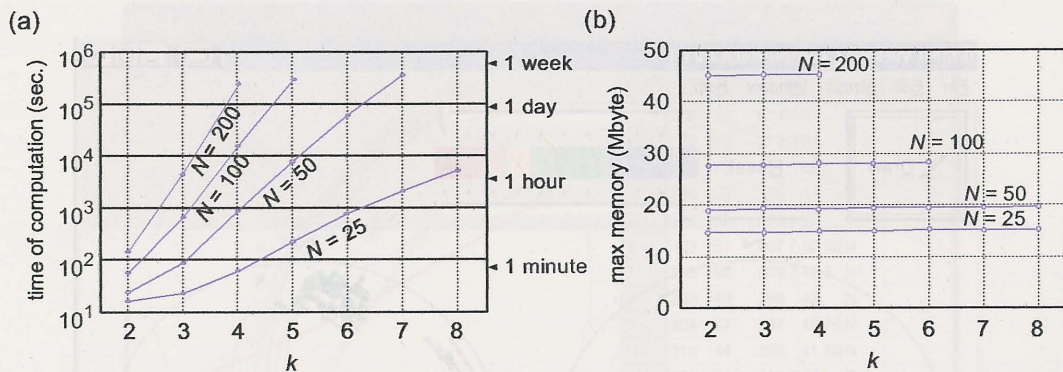


図2 メインプロセッサが計算に要する時間とメモリー。測定に用いたパソコンは、Pentium II, 300 MHz, メモリー 128 MB を搭載。

さて、計算に要する時間は、断層の数 N と断層組み合わせ数 k と、それからもちろん計算機の速度に依存します。メインプロセッサは、応力テンソルインバージョンを ${}_NC_k$ 回実行します。ただし、

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

は2項係数で、 $N \gg k$ なら N^k のペースで増大します。つまり、データ数が多ければ、長大な計算時間を要します。とはいえ、最近のパソコンはCPUが速くなっているので、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。図2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型のPCで測定したもののなので、最新のパソコンならこの図よりひと桁小さい時間ですむでしょう。なお、図1で分数 $1000/2002$ が計算の進行状況を表示していましたが、その分母は ${}_NC_k$ の値を表しています。

現バージョンのメインプロセッサは、 ${}_NC_k$ の値を2億1474万3647未満に制限しています。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からです。図1(a)において、例えば $N=200$ の場合に k が4までしかプロットされないのは、 ${}_{200}C_5$ がこの制限を超えるからです。この制限は、64ビット整数を利用することにより、将来のバージョンでは事実上撤廃されることとなります。

4 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、最も重要な機能はメインプロセッサの計算結果をステレオネットを使って可視化する機能です。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。

§4.1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 §4.3 で説明します。§4.2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。

4.1 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3) とデータウィンドウ (図4) 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くか (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、次の手順による：

1. ポストプロセッサの実行ファイル miv4.exe を起動

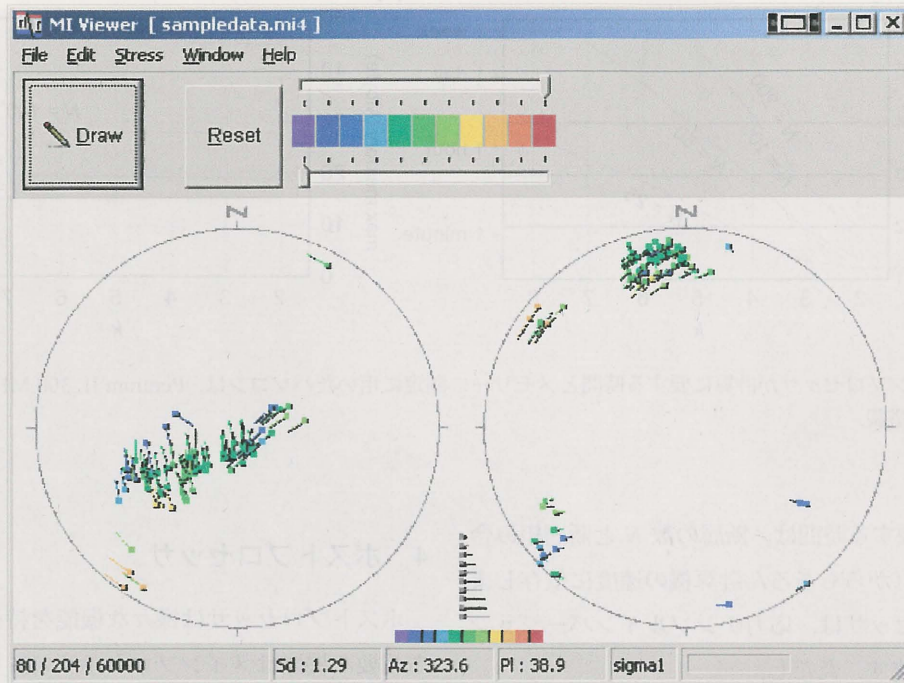


図3 ポストプロセッサ (MI Viewer) のメインウィンドウ。タイトルバーに示された sampledata.mi4 は、読み込んだファイルの名前。メインプロセッサの計算結果は、2つのステレオネット (下半球等積投影図) に示される。

する。

2. メインウィンドウの File メニューから Open をクリックし、読み込むべきファイルを指定する。読み込み終了とともに、データウィンドウには、計算に用いた断層スリップデータがステレオネットに表示される (図4)。
3. メインウィンドウ上の Draw ボタンをクリックすると、メインウィンドウ上の2つのステレオネットを使って計算結果の可視化が実行される (図3)。
4. メインウィンドウ上の File メニューから Exit を選ぶと、ポストプロセッサの実行が終了し、メインウィンドウとデータウィンドウが消える。

4.2 可視化

ウィンドウごとに、表示結果の見方を説明します。

■**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ネットは、検出された応力状態^{*2}を表します (図3)。それぞれのステレオネット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が、1匹

のオタマジャクシの頭と尾と色とが、1つの応力状態を、次のようにして表現しています。

まず、オタマジャクシの色が応力比

$$\Phi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (0 \leq \Phi \leq 1)$$

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。 $\Phi = 0$ 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です。応力比の値は 0.1 きざみの 11 段階の色で区別されます。メインウィンドウ上では、Reset ボタンの右側と2つのステレオネットの下に、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3)、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。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同じ尾の方向と長さのものが、ステレオネット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

^{*2} 応力状態という語の定義は、付録Cにあります。

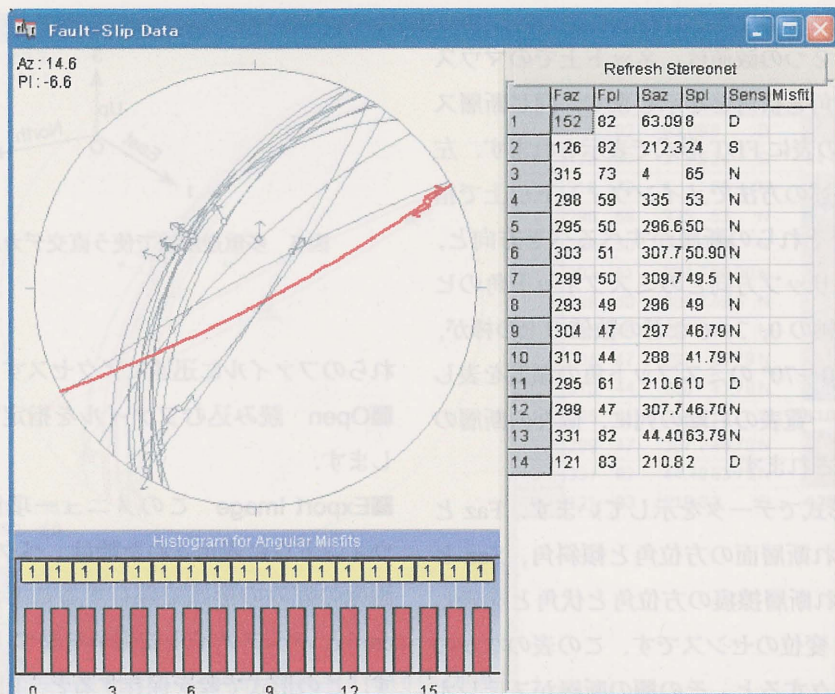


図4 ポストプロセッサのデータウィンドウ。右の表には、計算に用いたFDT形式の断層スリップデータが示されている。同じデータが、左上のステレオネット(下半球等角投影図)にも表示されている。

うした複数のクラスターで表現されるわけです。オタマジャクシの頭と尾は、応力主軸の方向を次のようにして表しています。

ペアのステレオネットは、両方とも下半球等積投影図ですが、左のステレオネット上では、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。ペアのステレオネット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、それらは尾の長さと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。右側のステレオネットでは、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、頭だけでなく、尾をもったオタマ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。

メインウィンドウの下部にはステータスバーがあって、幾つかの数値が示されています(図3)。その中央部に表示された「Az:」と「Pl:」という2つの欄の数値は、ステレオネット上でマウスポインターの現在位置が指す方位角と伏角とを示しています。また、その右の欄には、ポインターが載っているのがどちらのステレオネットかを表示します。左のステレオネットなら signal と、右のステレオネットなら sigma3 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ネットから出ると、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、§4.3で解説します。

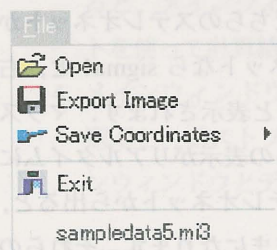
■データウィンドウ データウィンドウには3つのパネルがあります(図4)。左上のパネルには計算に使った断層スリップデータが下半球等角投影で示されます。ステ

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すべき方向と、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。横軸の0, 3, 6などの数値の上の棒が、0~10°, 30~40°, 60~70°のミスフィット角の頻度を表します。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。

この表は、FDT形式でデータを示しています。FazとFplの列は、それぞれ断層面の方位角と傾斜角、SazとSplの列は、それぞれ断層擦痕の方位角と伏角とを表します。Sensの列は、変位のセンスです。この表のなかのひとつの欄をクリックすると、その欄の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。図4をキャプチャーする直前には、第1番の断層のFazの欄をクリックしたところだったので、この断層がステレオネット上でハイライト表示されています。ハイライト表示を消すには、表の上のRefresh Stereonetというボタンをクリックしてください。

4.3 メニュー項目ごとの機能説明

ポストプロセッサの次に説明する豊富な機能により、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。



4.3.1 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

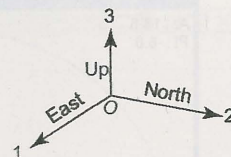


図5 多重逆解法で使う直交デカルト座標 O-123.

れらのファイルに迅速にアクセスすることができます。

■Open 読み込むファイルを指定するときにクリックします。

■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の好みの形式で保存することができます。前者はcmfというファイル拡張子を持つEnhanced metafileです。この形式で絵を保存すると、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。ファイルを保存するときに現れるダイアログで、JPEGの方を選ぶと、JPEG画像として保存することもできます。

■Save Coordinates 表示されたオタマジャクシ記号の表す応力状態群を表す数値を、テキストファイルに書き出すためのメニュー項目です。この項目に、2つのサブメニュー項目を持ちます。Principal axes and stress ratiosおよびReduced Stress Tensorsです。前者が選択されると、各オタマジャクシ記号の表す σ_1 の方位角・伏角、 σ_3 の方位角・伏角および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。後者のサブメニュー項目の場合は、各オタマジャクシが表す換算応力テンソルの成分 σ_{11} , σ_{12} , σ_{13} , σ_{22} , σ_{23} , σ_{33} が書き出されます。換算応力テンソルについては、付録Cを見てください。応力成分を表す直交デカルト座標は、図5に示したものを使います。



4.3.2 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。

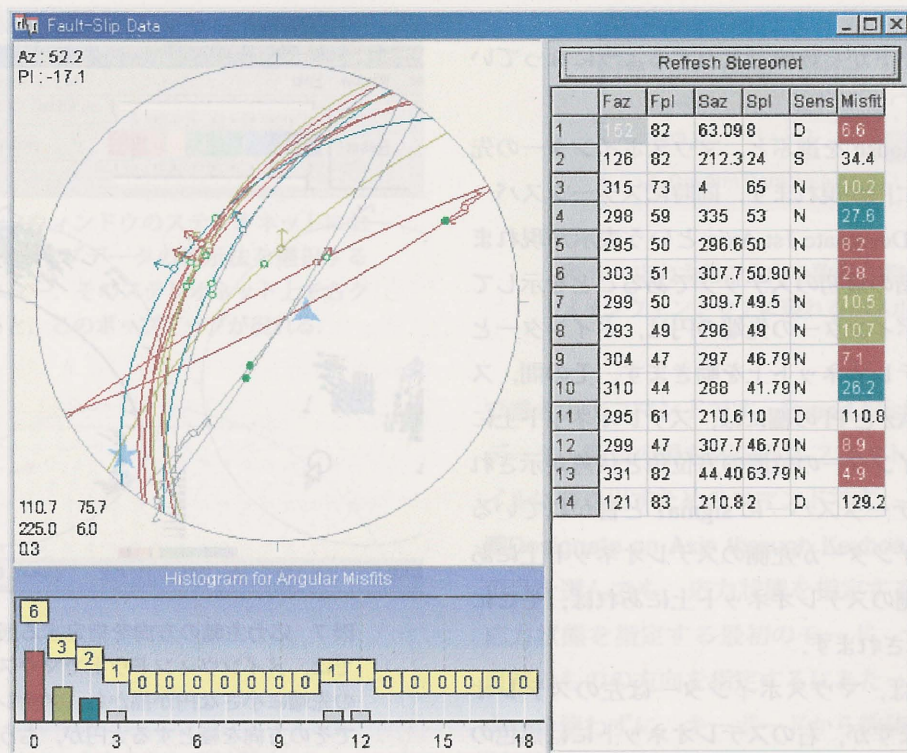
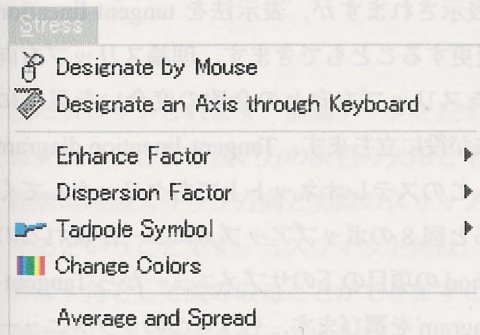


図6 ステレオネットおよびデータ一覧表に示された14条の断層のおおのが、ある応力状態のもとで、どの方向に動くかという数値計算を行った結果がデータウィンドウに示されている。応力状態は、ステレオネットの左下に数値で示されている。すなわちこの例では、 σ_1 軸の方位角と伏角が 110.7° と 75.7° 、 σ_3 軸では 225.0° と 6.0° 、応力比が 0.3 である。それらの主軸方向は、ステレオネット上で、それぞれ▲および★という記号で表示されている。緑の丸印は理論スリップ方向だが、open circle は正断層センスを、closed circle は逆断層センスを意味する。データ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。



4.3.3 Stressメニュー

Stress メニューの下には、応力状態の表示法や、特定の応力状態を選択するなどの機能が集められています。

■Designate by mouse ポストプロセッサは、簡単な数値計算の機能を持っています。データウィンドウに表示されている断層が、指定した応力状態において、どの方向に動くか計算する機能です。そして、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 (ミ

スフィット角) が示されます^{*3}。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す。計算結果は、データウィンドウに図6のように表示されます。

応力状態は、メインウィンドウ上で指定します。この文書では、同一の主軸方向と同一の応力比を持つ応力テンソルは、すべて同じ応力状態とみなします。Stress メニューの下で Designate by mouse により、応力状態を指定することができます。1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つの主軸方向の指定と、それに続く応力比の指定です。前者の場合、それらをマウス操作だけでできますが、主軸方向の微妙な指定が難しい。後者では、最初に指定する主軸について、方位角と

^{*3} 理論スリップ方向の計算には、Wallace-Bott 仮説 (付録B) が使われています。

伏角とをキーボードから数値で入力するようになっていきます。

Designate by mouse を選ぶと、マウスポインターの先端に図 7 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ネット上を動きます。その間、ステータスバーの Az と Pl の欄には、ステレオネット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 7 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ネット上にあるからです。右側のステレオネット上であれば、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ネット上にありますが、右のステレオネット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、他方のステレオネットにはそれを極とする大円が残されます。

他方の主軸の方向は、必ずこの大円上にありますから、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。

応力比を指定するには、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します。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^{*4}。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。応力状態が

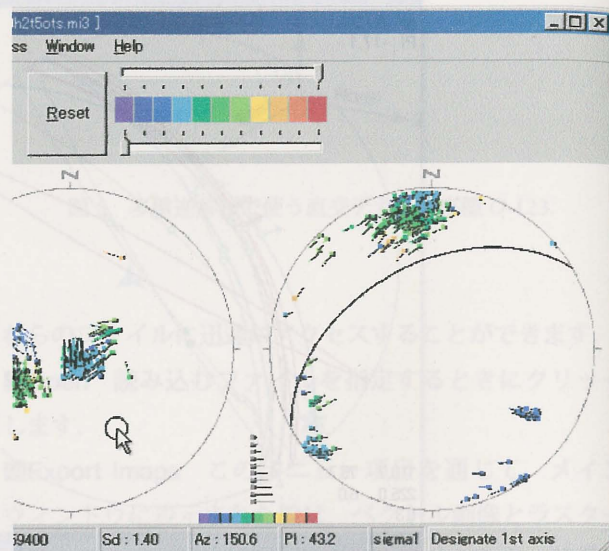


図 7 応力主軸の方向を指定する最初のモードでは、メインウィンドウ上でマウスポインターの先端に小さな円が描かれ、ステレオネット上でその方向を極とする大円が、もう一方のステレオネットに描かれる。小さな円とそれを極とする大円は、マウスの動きに追従して移動する。

指定されたなら、直ちにポストプロセッサはデータウィンドウに各断層の理論スリップ方向を表示します(図 6)。

データウィンドウ上のステレオネットには、断層スリップデータが表示されますが、表示法を *tangent-lineation diagram* に変更することもできます。理論スリップ方向と観察されたスリップ方向との合致の度合いを見るには、この図法が役に立ちます。Tangent-lineation diagram にするには、このステレオネット上で右クリックしてください。すると図 8 のポップアップメニューが現れるので、Plot Method の項目の下サブメニューから Tangent-Lincation Diagram を選びます。もう一つのサブメニュー項目 Slip Vectors on Great Circle の方を選べば、これまで通りの図法で断層スリップデータがプロットされます。

図 6 と同じ内容を Tangent-lineation diagram として示したのが図 9) です。薄い灰色の矢印が後者の図に多数プロットされています。ひとつの矢印は、その矢印の位置を極とする断層面の理論スリップ方向を示します。つまりその矢印の方向に、下盤が動くことを示します。観察した断層のスリップ方向は、濃い灰色・オリーブ色・青緑・茶色のいずれかの色の矢印で、同じステレオネット

^{*4} カラーバーの i 番目の箱は、応力比 $\Phi = (i-1)/10$ 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。

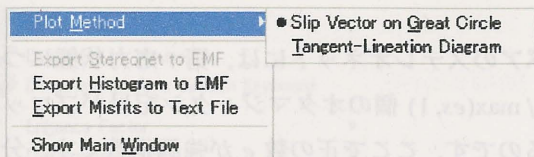


図8 データウィンドウのステレオネットにおける断層スリップデータの表示法を選択するためのメニュー。そのステレオネット上で右クリックすると、このポップアップが現れる。

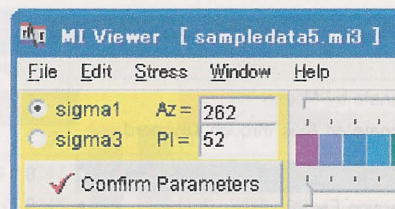


図10 応力主軸の方向を数値で指定するためにメインウィンドウ上に現れるパネル。

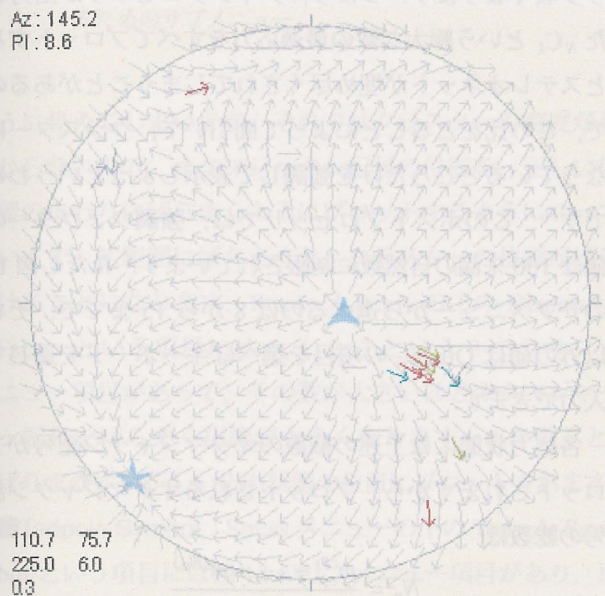


図9 図6のステレオネットと同じ情報を示す tangent-lineation diagram.

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。

■Designate an Axis through Keyboard このメニュー項目を選んでも、応力状態を指定することができます。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向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10の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、ステレオネット上には小さな円とそれを極とする大円とが描かれます。

正しい方向が指定できたなら、Confirm Parameters 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、後はメニュー項目 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。

■Enhance Factor メインウィンドウのペアのステレオネット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 Stress メニューの下はこのメニュー項目の目的です。この項目の下には図11のようなサブメニューがあって、そこに示された数が強

上にプロットされます。観測データを表す矢印が、背景にプロットされた淡い方の灰色の矢印と平行なら、その断層は理論スリップ方向と実際のスリップ方向とが合致するということです。ミスフィット角は、それらの矢印のなす角として読み取ることができますし、データ一覧表の最右列に数値でも示されます。

応力状態がメインウィンドウ上で指定されると、データウィンドウには、理論スリップ方向とミスフィット角とが表示されます。それらの表示結果は、図8のポップアップメニューを通じて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

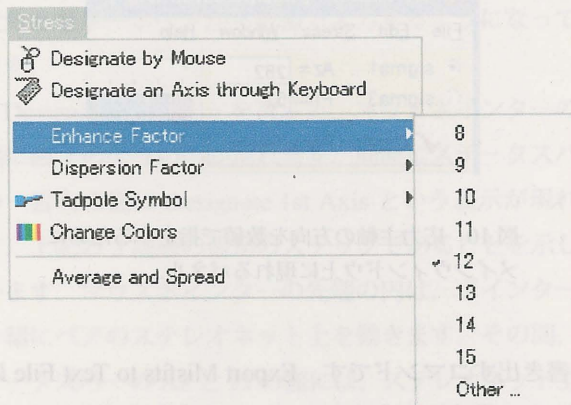


図 11 Enhance factor e can be changed through this menu.

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。

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、 N 条の断層が与えられたならそれらから k 条の部分集合をつくり、その部分集合について最適応力を計算します。部分集合の数は ${}_NC_k$ 個作ることができ、結果として同じ個数の最適解が得られます。このソフトウェアパッケージは、 $N_G = 60,000$ 個の格子点を持つ計算メッシュを内部で用いて、それら各点が別々の応力状態を表しています。得られた最適応力は、最近応力状態の格子点で代表されます。多重逆解法は、 ${}_NC_k$ の有権者が N_G 個の候補に対して投票することにとえることができるので、第 i 番の応力状態^{*5}に $m^{(i)}$ 票入ったとしましょう。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 [15]。そこで、得票数の標準偏差を s とします。すなわち、

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

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、そこに示されるのが s の値です。

^{*5} 番号付けの順番は、ここでは任意です。

ペアのステレオネットには、第 i 応力状態について $m^{(i)} / \max(es, 1)$ 個のオタマジャ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 $\max(es, 1)$ の意味は、 es が 1 より小さければ 1 を分母にし、そうでなければ es を分母にせよ、ということです。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ャクシ記号の数は $m^{(i)}$ 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 ${}_NC_k$ という膨大な数の最適応力をすべてプロットするとステレオネット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^{*6}。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 11 のサブメニューから選べるのは 8 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ャ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ャクシ記号の総数は

$$N_p = \frac{m^{(1)} + \dots + m^{(N_G)}}{\max(es, 1)}$$

です。図 3 メインウィンドウのステータスバーには斜線で区切られて 80 / 204 / 60000 と書いてありますが、これは 3 つの数 N_p , ${}_NC_k$, N_G をこの順に並べて示しています。

■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ネット上には、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

^{*6} クラスターを強調表示する方法は簡便ですが、じつは多重逆解法の分解能を鈍らせる効果を持っています。クラスターは、このように間引かれてから認定されるべきではないのです。ここで強調ファクターを使っているのは、それを使わずにクラスターを認定するのが大変な仕事だからです。大変というのは計算量が大きいという意味です。そのためにわれわれはすでに、幾つかの方法を検討しています [6]。このプログラムパッケージの将来のバージョンでは、強調ファクターを使わないクラスター認定機能を付け加えます。

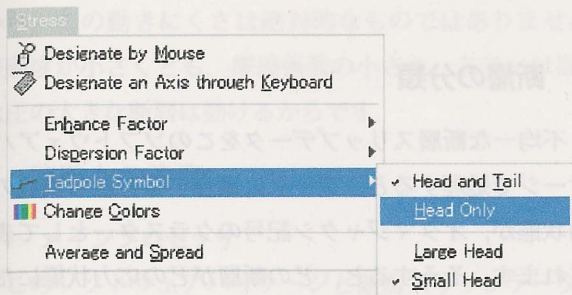


図 12 オタマジャクシ記号の持つ属性を変更するためのサブメニュー。

うに見えてしまいます。それではクラスター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きます。広範囲にばらまくと、クラスターの位置がぼやけることになります。Stress 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、その数が多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 Stress メニューの下の Tadpole Symbol という項目には図 12 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。それらの色と応力比との対応関係(カースキーム)は、Stress 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 13 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 という語の下には、これまで使ってきたカースキームの RGB 値が、New という語の下には、新たに設定したカースキームのそれが示されています。カースキームを変更するには、Click This Column と書かれた方の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

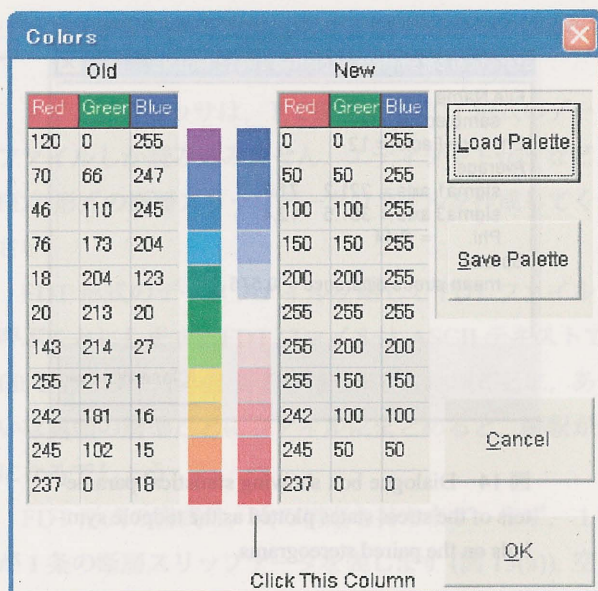


図 13 The color scheme to indicate stress ratios can be changed through this dialogue.

ための Windows 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。

新しく作ったカースキームは、ファイルに保存することができます。そのためには、図 13 の Save Palette ボタンをクリックし、ファイル名を指定してください。拡張子が pal になったテキストファイルが作られます^{*7}。また、すでにそのようにして保存したカ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 13 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。

カースキームの変更が終わったら、図 13 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 ボタンを押します。

■Average and Spread プロットされた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、Stress メニューの下のこの項目をクリックすると、全オタマジャクシ記号のあらわす多数の応力状態の平均とその分散にあたる量が計算され、図 14 のように表示さ

^{*7} このファイルはテキストファイルで、RGB 値が 16 進表現で書かれています。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。デフォルトでは、rainbow0.pal と同じカースキームです。

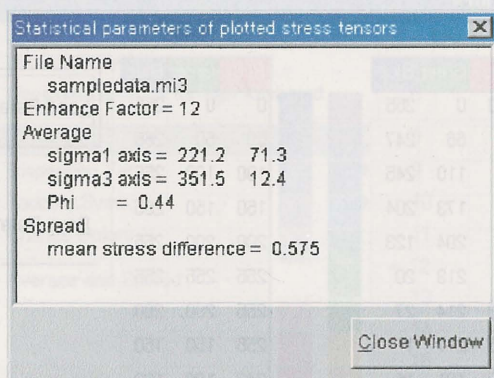
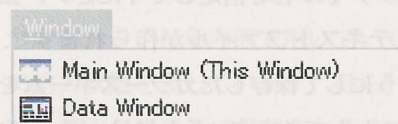


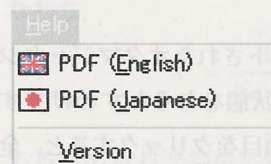
図 14 Dialogue box showing statistical parameters of the stress states plotted as the tadpole symbols on the paired stereograms.

れます。この図で Average としてある項目の下に、その平均が主軸方向と応力比で示されています。また Spread の下の mean stress difference の値が、その分散にあたる量で、これが大きいほどばらつきが大きいことを意味します。それらの定義は、付録 D にあります。



4.3.4 Window メニュー

メインウィンドウとデータウィンドウと、どちらを上に表示させるかを、このメニューから選択します。この選択肢は、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。



4.3.5 Help メニュー

Help メニューの下には、ここに示す 3 つの項目があります。2 番目の PDF (Japanese) を選ぶと、この PDF フォーマットのマニュアルが表示されます。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 断層の分類

不均一な断層スリップデータをこのソフトウェアパッケージで処理すると、データに適合する有意な複数の応力状態が、オタマジャクシ記号のクラスターとして表現されます。そうすると、どの断層がどの応力状態にたいおうするか、知りたくなるはずです。つまり、応力ごとに断層を分類することが課題となります。もし断層の活動順が、断層間の切断関係などで分かるなら、それに対応して検出された応力の新旧関係も分かることになります。

応力テンソルインバージョンは Wallace-Bott 仮説に立脚していますが (付録 B)、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、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。

そのためには、ミスフィット角を使うことができます。あるクラスターが表す応力状態をメインウィンドウ上で指定したなら、ミスフィット角が直ちにデータウィンドウに示されます。ミスフィット角が小さい断層は、その応力で動かされた可能性が高いことを示します。図 6 の場合、ヒストグラムが示すように、2 条をのぞいてすべての断層でミスフィット角が 30° 以下になります。したがってそれらの断層は、そこで指定した応力状態のもとで動いた可能性が高いことが分かります。2 条の断層はミスフィット角が 90° を超えているので、それら 2 条の動きは、その応力状態とは不調和で、他の応力状態で動いたと考えなくてはなりません。

ところで図 9 の tangent-linication diagram は、ほとんどの断層で、極の方向が $\sigma_1\sigma_2$ 主応力平面と平行に近いことを示しています。その図にプロットされた σ_1 軸の記号の右下の一群の矢印が、それを表しています。このことは、指定した応力状態のもとでのそれらの断層の易動度 (slip tendency) [3], すなわちそれらの断層面における剪断応力が小さかったことを示します。言い換えると、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。このことも、検出された応力と断層との対応関係を考える手がかりになります。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。

6 使用上の注意

6.1 メインプロセッサ

このソフトウェアパッケージと断層スリップデータを格納するディレクトリの名前には、英数字のみを使うのが賢明です。

メインプロセッサは何かエラーを検出すると、コンソールウィンドウにエラーメッセージを出力しますが、その直後コンソールウィンドウ自体が消去されてしまうので、メッセージを読むことができません。それを読むためには、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、名前の欄に cmd と入力して OK ボタンをクリックし、あらかじめコンソールウィンドウを開いておく必要があります。そのウィンドウ上でメインプロセッサをコマンドラインで起動すると、エラーメッセージが出てウィンドウ自体は消されませんから、メッセージを読むことができます。

6.2 ポストプロセッサ

- データ (mi4 ファイル) の読み込みエラーが発生した場合、もう一度同じデータファイルを読み込んでみてください。
- 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あります。その場合はポストプロセッサを終了して、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。Windows NT4 または XP なら、他のソフトに悪影響はないはずです。

7 将来のバージョン

多重逆解法を改良するプロジェクトが現在進行中です。ここに公開したバージョンでは、強調ファクターを試行錯誤的に変えて、クラスターを目の子で認定することになります。強調指数を与えた上で、K-means アルゴリズムを使ってクラスター認定を自動化することはすでにできているので [6]、そのソフトを公開する予定です。

□ 付録 A : FDT 形式

メインプロセッサは、下で説明する FDT 形式のデータファイルしか読み込みません。エディタや Excel などでも FDT 形式の断層スリップデータファイルを作成してください。

FDT 形式のデータファイルを略して FDT ファイルと呼ぶことにします。FDT ファイルは ASCII テキストで、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。

FDT 形式の書式は、次の構造を持ちます。まず、1 行が 1 条の断層スリップデータを表します (図 15(a))。空白の行があると、エラーとなります。各行は、4 つの正符号の数値とアルファベット 1 文字と、必要ならそれに続いて注釈からなります。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。1 文字のアルファベットは、N, R, D, S の 4 文字のうちの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)、逆断層 (reverse)、右ずれ断層 (dextral)、左ずれ断層 (sinistral) の区別を表します。それらは小文字でも大丈夫です。それらあわせて 5 つの項目は、1 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 1 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。

上記の 4 つの実数 f_{az} , f_{pl} , s_{az} , s_{pl} の定義は、図 16 から明らかでしょう。断層面の方向は、面上の最大傾斜方向の方位角と伏角を f_{az} と f_{pl} として測ります。方位角 f_{az} および s_{az} は、区間 $[0^\circ, 360^\circ]$ に入っていなければなりません。伏角 f_{pl} および s_{pl} の範囲は、区間 $[0^\circ, 90^\circ]$ です。

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 [16] を使って正しく記載できたかチェックしてください。図 15(b) も SFSA で作成しました。SFSA は、このソフトウェアパッケージと同じ URL で公開しています。

(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

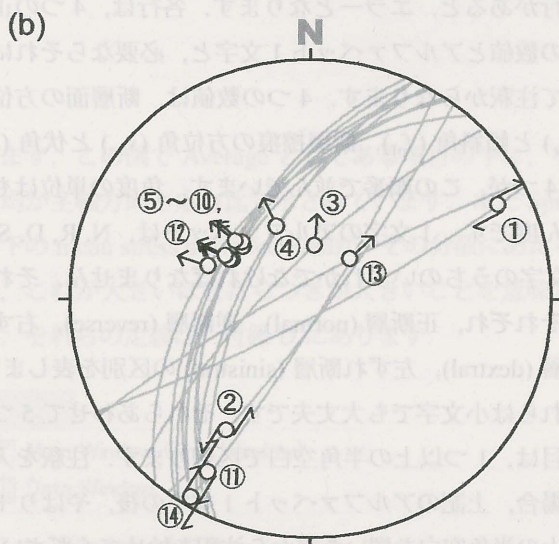


図15 (a)FDTファイル形式の例. 1行に1条分の断層スリップデータが記述されている. (b)下半球等角投影で示した(a)の断層スリップデータ. 丸数字は(a)のそれと共通の番号.

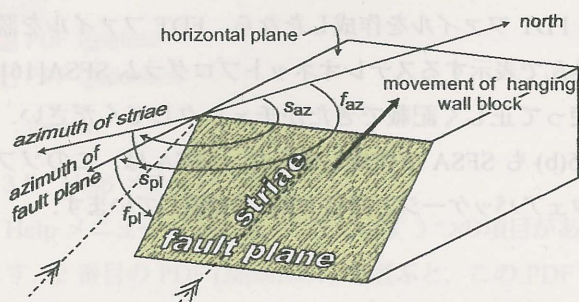


図16 断層面と擦痕の方向を表す4つの角 f_{az} , f_{pl} , s_{az} , s_{pl} .

□ 付録B：多重逆解法の原理

多重逆解法の原理は、文献[15]が解説しています。ここではその概略を紹介します。

■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、後者は Wallace-Bott 仮説にもとづいて応力と断層スリップとを結びつけている[2]。すなわち、断層面に作用する剪断応力の方向に断層スリップがおこる、というのが同仮説の主張である。このことを式で表すと、単位ベクトル $\vec{n}$ を法線とする断層面上に応力テンソル σ によって生ずる剪断応力は、ベクトル量として

$$\vec{s} = \sigma \cdot \vec{n} - (\vec{n} \cdot \sigma \cdot \vec{n}) \vec{n}. \quad (1)$$

と書けるので、断層スリップは $-\vec{s}$ の方向におこるというのが Wallace-Bott 仮説です[17]。したがって、応力テンソル σ を仮定すると、 $\vec{n}$ を法線とする断層のすべるべき方向が式(1)で計算できるわけです。

■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テンソル σ を最小自乗的に決定できるというのが古典的逆解法です。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(1)から計算した理論スリップ方向とのなす角(ミスマッチ角)を $d^{(i)}$ として、

$$S = f(d^{(1)}) + \dots + f(d^{(N)}), \quad (2)$$

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 $f()$ は減少関数[1]で、 N は断層の数です。図17は、メインプロセッサが使っている関数 f のグラフです。

逆解法が利用するデータは、断層面とスリップの方向で、どちらも無次元量ですから、次元を持つ応力テンソルの成分が決定できるわけではありません。決定できるのは、応力主軸の方向と応力比です。

■多重逆解法 多重逆解法は、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考え出されました。従来その目的では、露頭で小断層データをとる段階で小断層群をグループ分けしていました。それができれば、均

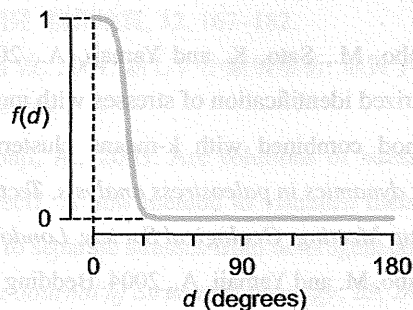


図 17 メインプロセッサが使っている関数 $f(d)$.

一なデータセットごとに古典的逆解法を適用して応力を推定できたわけです。しかし断層の分類は、現実にはむずかしい。そこで数値的にそれを行うべく、この方法が開発されました。

多重逆解法の核心的アイデアは、次のようなものです。すなわち、古典逆解法で決定できるのは応力主軸の方向と応力比ですが、主軸方向は3つの角度によって規定されます。例えば、 $\sigma_1\sigma_2$ 主応力面の走向・傾斜および σ_1 軸のレイク角の3つの角度、といった具合です。応力比と合わせると、古典逆解法で決定されるのは4つのパラメータです。したがって、それは4次元パラメータ空間の1点で表される。本ソフトウェアパッケージでは、4次元パラメータ空間に N_G 個の格子点を持つ計算メッシュを構築し、最適応力が古典逆解法で得られたなら、最近接格子点でそれを代表させています。

さて、 N 条分の断層スリップデータが与えられたなら、それから k 条を選んで部分集合を作り、それに対して古典逆解法を適用します。ただし、 k は4ないし5とします。結局、 N 個から k 個とる場合の数、すなわち $N C_k$ 個の最適応力が得られるわけです。それらの最適応力がそれぞれ最近接格子点で代表されます。多数の最適解がパラメータ空間でクラスターをなすならば、そのクラスターが与えられた N 条の断層スリップデータにフィットする応力状態であるとみなされます。

ただし、そうして現れるすべてのクラスターが有意というわけではありません。多重逆解法で得られる複数の応力状態は、データに適合するものが列挙されるだけであり、そのいずれが正しいかは別の地学的証拠から判断されます。しかし、ミスフィット角を使うと、単一の応力

状態ですべての断層スリップデータが説明できるか、あるいは不可欠な応力状態はどれとどれか、という判断はポストプロセッサをつかって判断することができます。

□ 付録 C : stress difference

2つの応力状態がどれだけ違うかを表すパラメータが、stress difference です。詳しくは [4] を見てください。ここでは簡単な紹介にとどめます。

まず、応力状態という語を、次のように定義します。すなわち、同一の応力主軸の方向を持ち同一の応力比を持つすべての応力を同一の応力状態と呼ぶことにします。

2つの応力状態 $\bar{\sigma}_{ij}^{(1)}$ および $\bar{\sigma}_{ij}^{(2)}$ が与えられたなら、それらの間の stress difference は

$$D = \frac{1}{3} \left\{ (\Delta_{11} - \Delta_{22})^2 + (\Delta_{22} - \Delta_{33})^2 + (\Delta_{33} - \Delta_{11})^2 + 6(\Delta_{12})^2 + 6(\Delta_{23})^2 + 6(\Delta_{32})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

と表されます。ただし、 $\Delta_{ij} = (\bar{\sigma}_{ij}^{(1)} - \bar{\sigma}_{ij}^{(2)})$ であり、 $\bar{\sigma}_{ij}$ は次の2つの条件を満たすものとします： $\bar{\sigma}_{11} + \bar{\sigma}_{22} + \bar{\sigma}_{33} = 0$ および

$$\sigma_S^{\text{oct}} = \frac{1}{3} \left\{ (\bar{\sigma}_{11} - \bar{\sigma}_{22})^2 + (\bar{\sigma}_{22} - \bar{\sigma}_{33})^2 + (\bar{\sigma}_{33} - \bar{\sigma}_{11})^2 + 6(\bar{\sigma}_{12})^2 + 6(\bar{\sigma}_{23})^2 + 6(\bar{\sigma}_{32})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = 1. \quad (3)$$

です。これらの条件を満たす $\bar{\sigma}_{ij}$ を換算応力テンソル (reduced stress tensor) といいます。応力状態が等しい2つの応力テンソルは、同一の換算応力テンソルを持ちます。逆も成り立ちます。Wallace-Bott 仮説が予言する断層スリップの方向は、同一の応力状態では同じ方向になります。したがって、同仮説に立脚する逆解法では、応力状態を同じくする複数の応力テンソルを区別することができません。

さて、stress difference D がゼロならば、2つの応力状態は等しいといえます。 D が大きいほど、2つの応力によってあるひとつの断層に生ずるスリップ方向のなす角が大きくなります。そして D が最大値2になると、どんな方向の断層であれ、正反対の方向にスリップするようになります。そこで、 $D=2$ である2つの応力を、inverse stress と文献 [4] では読んでいます。

□ 付録 D : 応力状態の平均とばらつき

応力状態の平均 (average stress) とそのまわりの複数の応力状態のばらつき (spread) とは、次のように定義されます。すなわち、応力状態が N 個与えられているとして、それらを $\sigma^{(1)}, \dots, \sigma^{(N)}$ とします。応力状態の平均は、それらの成分ごとの平均

$$\langle \sigma \rangle = \frac{1}{N} [\sigma^{(1)} + \dots + \sigma^{(N)}],$$

です。このテンソルの主軸が、平均的応力状態の主軸であり、その固有値を $\langle \sigma \rangle_1, \langle \sigma \rangle_2, \langle \sigma \rangle_3$ とすると、平均的応力状態の応力比は

$$\langle \Phi \rangle = \frac{\langle \sigma \rangle_2 - \langle \sigma \rangle_3}{\langle \sigma \rangle_1 - \langle \sigma \rangle_3}$$

となります。

与えられた応力状態のうちの第 i 番目のものと、この平均的応力との間の stress difference を $D^{(i)}$ とすると、応力状態のばらつきは、

$$\langle D \rangle = \frac{1}{N} [D^{(1)} + \dots + D^{(N)}]$$

と定義されます [19]。

参考文献

- [1] Angelier, J., 1979. Determination of the mean principal stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, **56**, T17-T26.
- [2] Angelier, J., 1994. Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In, Hancock, P. L., ed., *Continental deformation*, Pergamon Press, Oxford, 53-101.
- [3] Morris, A., Ferrill, D.A. and Henderson, D.B., 1996. Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, **24**, 275-278.
- [4] Orife, T. and Lisle, R.J., 2003. Numerical processing of palaeostress results. *Journal of Structural Geology*, **25**, 949-957.
- [5] Otsubo, M., Hayashi, D., Yamaji, A., Yamada, S., Matsuda, T., submitted. Beginning of the present-day stress field after 125 ka in the Southern Ryukyu arc. *Journal of Geophysical Research*.
- [6] Otsubo, M., Sato, K. and Yamaji, A., 2004. Computerized identification of stresses with multi-inverse method combined with k-means clustering. *Proc. New dynamics in paleostress analysis, Tectonic Study Group Meeting, Geological Society, London*.
- [7] Otsubo, M. and Yamaji, A., 2004. Bedding tilt test for paleostress analysis by K-means clustering combined with the multi-inverse method. *Proc. New dynamics in paleostress analysis, Tectonic Study Group Meeting, Geological Society, London*.
- [8] Rakhmanov, E.A., Saff, E.B. and Zhou, Y.M., 1994. Minimal discrete energy on the sphere. *Math. Res. Lett.*, **1**, 647-662.
- [9] Ramsay, J. and Lisle, R.J., 2000. *The techniques of modern structural geology, vol. 3: applications of continuum mechanics in structural geology*. Academic Press, New York.
- [10] Saff, E.B. and Kuijlaars, A.B.J., 1997. Distributing many points on a sphere. *Math. Intelligencer*, **19**, 5-11.
- [11] Sato, K. and Yamaji, A., 2004. Embedding stress difference in σ -space: a theoretical basis for stress inversion. *Proc. New dynamics in paleostress analysis, Tectonic Study Group Meeting, Geological Society, London*.
- [12] Sato, K. and Yamaji, A., 2004. Uniform computational mesh for the improvement of the resolution and efficiency of stress tensor inversion. *Proc. New dynamics in paleostress Analysis, Tectonic Study Group Meeting, Geological Society, London*.
- [13] 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.
- [14] Twiss, R.J. and Moores, E.M., 1992. *Structural Geology*, W.H. Freeman, New York.
- [15] Yamaji, A., 2000. The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, **22**, 441-452.
- [16] 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.

- [17] 山路 敦, 2001. 新しい小断層解析. 地質学雑誌, 107, 461-479.
- [18] Yamaji, A., 2003. Are solutions of stress inversion correct? A new method to visualize their reliability and to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 25, 241-252.
- [19] Yamaji, A., Tomita, S. and Otsubo, M., 2005 Bedding tilt test for paleostress analysis. *Journal of Structural Geology*, 27, 161-170.

索引

易動度, 12

Wallace-Bott 仮説, 14

FDT 形式, 13

FDT ファイル, 13

応力状態, 15

応力状態のばらつき, 16

応力状態の平均, 16

応力比, 4

オタマジャクシ記号, 4

換算応力テンソル, 15

強調ファクター, 9

Stress difference, 15

Tangent-lineation diagram, 8

断層スリップデータ

不均一な, 1

直交デカルト座標, 6

ポストプロセッサ, 3

—のデータウィンドウ, 3

—のメインウィンドウ, 3

ミスフィット角, 14

メインプロセッサ, 1

参考文献

- [1] Angelier, J., 1979. Determination of the mean principal stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, 59, 717-725.
- [2] Angelier, J., 1984. Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In: Hancock, P. L., ed. *Continuum deformation*. Pergamon Press, Oxford, 53-101.
- [3] Morris, A., Parfitt, D. A. and Henderson, D. O., 1994. Slip-sensory analysis and fault reactivation. *Geology*, 22, 273-276.
- [4] Ogata, T. and Lisle, R. J., 2001. Numerical processing of kinematic results. *Journal of Structural Geology*, 23, 943-957.
- [5] Oshio, M., Hasegawa, O., Yamaji, A., Yano, S., Matsuda, T., Submitted. Beginning of the present compressional field after 125 ka in the Southern Ryukyu arc. *Journal of Geophysical Research*.

- [6] Oshio, M., 2001. 小笠原列島の構造と地質. *地質学雑誌*, 127, 167-182.
- [7] Yamaji, A., 2001. A new method to visualize their reliability and to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 23, 241-252.
- [8] Yamaji, A., Tomita, S. and Oshio, M., 2002. Bedding-slip test for palaeostress analysis. *Journal of Structural Geology*, 24, 181-190.
- [9] Ramberg, H. and Lisle, R. J., 2000. The evolution of modern structural geology: the application of computer methods to structural geology. Academic Press, New York.
- [10] SAE, E. B. and England, A. P. L., 1992. Distributing many points on a sphere. *Math. Intelligence*, 17, 2-11.
- [11] Sato, K. and Yamaji, A., 2004. Homogeneous stress distribution in a sphere: a theoretical basis for stress inversion. *Proc. New Advances in paleostress analysis. Theoretical Study Group Meeting, Geological Society, London*.
- [12] Sato, K. and Yamaji, A., 2004. Uniform compression: a new method for the improvement of the precision and efficiency of stress tensor inversion. *Proc. New Advances in paleostress analysis. Theoretical Study Group Meeting, Geological Society, London*.
- [13] 山崎, A., 2001. 小笠原列島の構造と地質. *地質学雑誌*, 127, 167-182.
- [14] Wells, R. J. and Moore, E. M., 1993. *Structural Geology*. W. H. Freeman, New York.
- [15] Yamaji, A., 2000. The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 22, 341-352.
- [16] 山崎, A., 2001. 小笠原列島の構造と地質. *地質学雑誌*, 127, 167-182.