

地震学的に推定される応力と地質学的に推定される活断層の 運動方向との比較：阿寺断層系の例

Comparison between the seismologically determined stress and the geologically determined slip direction along an active fault: An example of the Atera fault system, Central Japan

藤内智士¹・重松紀生²・今西和俊²・吾妻 崇²・溝口一生³・大谷具幸⁴・沓名亮輔⁴

Satoshi Tonai¹, Norio Shigematsu², Kazutoshi Imanishi², Takashi Azuma², Kazuo Mizoguchi³,
Tomoyuki Ohtani⁴ and Ryoosuke Kutsuna⁴

¹ 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation, s-tonai@aist.go.jp)

² 活断層・地震研究センター (AIST, GSJ, Active Fault and Earthquake Research Center)

³ 電力中央研究所 (Central Research Institute of Electric Power Industry)

⁴ 岐阜大学 (Gifu University)

Abstract: We compared the seismologically determined stress with the fault-slip data observed at the outcrops along the Atera fault, Central Japan, to understand relationship between the crustal stress and the slip directions of active faults. The seismologically determined stress was estimated by a stress tensor inversion technique from the focal mechanism solutions. The focal mechanism solutions are mixture of strike-slip- and reverse-faulting types. We obtained the stress with the maximum principal stress S_1 oriented horizontally NW-SE or WNW-ESE. The fault-slip data were obtained at five outcrops of the Atera fault. We observed more than 100 slickenlines on fault planes and acquired 95 fault-slip data. We calculated a misfit angle of each fault-slip data for the stress and found that most fault-slip data obtained from the main fault planes have small misfit angles less than 30° , whereas those obtained apart from the main fault planes have a wide range of misfit angles. This variety of misfit angles indicates that slickenlines in the damage zone have been formed by several different stresses.

キーワード: 阿寺断層系, 活断層, 微小地震, 発震機構解, 応力逆解析, 小断層

Keywords: the Atera fault system, active fault, microearthquake, focal mechanism solution, stress tensor inversion, minor fault

1. はじめに

本研究は、基盤岩に見られる断層が活断層であるかどうかを判断する評価法を作ることを目的とし、活断層・地震研究センターの2010年度融合研究「応力逆解析と断層運動方向を利用した断層活動性評価手法の開発」の一環として実施した。活断層の認定は、通常、地質学的に若い地層（第四紀以降）の変位にもとづいて行われる。こうした手法では断層が実際に最近活動した痕跡を見つけるので、活断層の認定方法として信頼性が高い。しかし、第四紀層による手掛かりがない断層については、この方法にもとづいて活断層であるかを判断することはできない。

一方、地震を起こす断層活動の物理現象を利用した活断層の認定方法を考えることもできる。地震の際にすべる断層は応力を受けた結果動くので、その運動方向は地震を起こした応力（起震応力）を反映すると考えられる。そこで、対象とする断層が示す

運動方向と、断層周辺の地震発生域の現在の応力を比較すれば、その断層の活動性を評価する指標になる可能性がある。ただし、両者の関係はおそらく単純ではない。地震の破壊過程や、断層周辺の地質によって、起震応力と断層の運動方向との関係が変わり、同じ断層面内でも関係は一様でないと考えられるからである。したがって、地震を起こす応力と断層の地表での運動方向との関係を調べる必要がある。

本研究では基盤岩の露出が良い活断層である岐阜県東部の阿寺断層系を例に、地震発生域の応力と活断層の運動方向を比較して、両者の関係について調べた。応力は対象地域で起こる微小地震の発震機構解を用いた応力逆解析から推定し、活断層の運動方向は主断層面および周辺のダメージゾーン (Caine *et al.*, 1996) に発達する小断層で観察される断層条線の方法から推定した。

2. 調査地域の地質概要と阿寺断層系の特徴

阿寺断層系周辺には後期白亜紀の濃飛流紋岩と花崗岩類が広く分布し、これらの岩体を新第三紀および第四紀の堆積岩類と火山岩類が局所的に覆う（第1図）。また、調査地域内の断層は北西-南東と北東-南西の二走向が卓越し、その多くは活断層とされる（活断層研究会編，1991）。

阿寺断層系は、岐阜県中津川市東部から北西-南東もしくは北北西-南南東走向に同下呂市まで、約70 kmにわたって続き（第1図）、北部から萩原断層、西上田断層、湯ヶ峰断層、下呂断層、宮地断層、小和知断層、および阿寺断層で構成される（佃ほか，1993）。この断層系は、主に濃飛流紋岩と花崗岩類に変位を与え、さらに第四紀の堆積岩類・火山岩類も変位させている（例えば、Sugimura and Matsuda, 1965; 岡田，1981）。

阿寺断層系に切られる岩体は、左ずれおよび北東側隆起の上下変位を示す（佃ほか，1993）。左ずれの変位量は、断層系の中央部で6~7 km（山田，1981）、南東端で2~3 km（山田，1978a, b）と見積もられている。また、上下変位によって北東側の阿寺山地と南西側の美濃高原が分断され、断層両側の侵食平坦面のずれから北東側の相対的な隆起量は700~800 mとされる（山田，1978a）。段丘面を構成する第四紀層の堆積年代と変位量より阿寺断層系の平均変位速度は千年あたり2.8 mとされ（佃ほか，1993）、トレンチ調査から求められた活動の再来期間は約2千年とされる（岡田・松田，1976；平野，1981；岡田ほか，1987；佃ほか，1993）。また、阿寺断層系中南部（小和知断層と阿寺断層）の最新活動時期は約400年前と考えられ、1586年に起こった天正地震の際に阿寺断層が活動した可能性が指摘されている（遠田ほか，1994, 1995）。

3. 微小地震を使った応力の推定

阿寺断層系に沿った地震活動は南部域を除いて不活発である。そこで本論では、阿寺断層系南部域で2003年10月から2010年10月までに発生した気象庁マグニチュード1.5以上の微小地震のデータを用いて応力の推定を行うことにした。解析した最大のマグニチュードは2.8である。本論では微小地震のメカニズム解をP波初動の押し引きデータに加えてP波とSH波の振幅値も同時に使うことにより発震機構解を決定した。この手法は、Imanishi *et al.* (2006, 2011)でも使用され、その有効性が示されている。解析手順の詳細については、今西ほか(2006)に詳しい。解析にはP波初動の押し引きデータが10個以上ある地震を使用した。

全ての微小地震データの推定結果とP波初動極性との比較を第2図に示す。全部で22個の発震機構解を決定した。決定した発震機構解は概ね初動極性を

満足する。P軸は北西-南東から西北西-東南東方向を持つものがほとんどであるが、横ずれ型と逆断層型が混在している。空間分布の特徴を見るために、決定した発震機構解を震源の深さ3 kmごとに分けて、第3図に示す。また、発震機構解のタイプを視覚的に判断しやすくするためにFrohlich(1992)の三角ダイアグラムを使い、逆断層成分、正断層成分、横ずれ断層成分のそれぞれの比率に応じて色分けを行った。深度9~14 kmの範囲では、横ずれ断層タイプが多い。それに対して、深度14~20 kmの範囲では逆断層タイプが多い。

発震機構解を用いて、Michael (1987)が提案した逆解析法で、最適応力および95%信頼限界の範囲を決定した。最適応力は、北西-南東から西北西-東南東方向で水平に近い最大圧縮主応力軸を持つ（第4図）。解析に用いた全ての発震機構解について最適応力から計算される理論的なすべり方向と実際のすべり方向との角度差（ミスフィット角）は30°以下である。このことから、今回解析に用いた全ての発震機構解は一つの応力で説明ができ、微小地震データを取得した領域の現在の応力場は比較的均一であると言える。したがって、微小地震から求めた応力を阿寺断層系における地震発生域の応力と判断した。

4. 阿寺断層系の条線が示す運動方向

次に、阿寺断層系の地表における運動方向を知るために、同断層系の主断層面およびダメージゾーンの小断層のすべり方向を観察した。露頭で観察される、形態・条線・複合面構造・断層面上の非対称構造（第5図）を基準として、断層面の方向・すべり方向・すべりセンスからなる断層スリップデータ（山路，2001）を全部で100条以上取得した。断層の観察は、先行研究によって記載された阿寺断層系の断層露頭を含む5箇所で行った（第1図）。このうち、4箇所（川上、田瀬、舞台峠、および小郷）は主断層面が露出する断層露頭で、1箇所（付知）は主断層面から約100 m離れた露頭である。

川上露頭 (35°36'21.47"N, 137°29'45.39"E, 標高477 m)

川上露頭では、北北西-南南東走向の断層によって東側の白亜紀後期の苗木-上松花崗岩と西側の濃飛流紋岩が接する(Niwa *et al.*, 2009)。両側の母岩はともに破碎が著しく、主断層面から10~20 mの範囲にわたり断層角礫岩が分布するなど、ダメージゾーンを形成している(Niwa *et al.*, 2009)。この露頭で主断層面およびダメージゾーンの小断層から22条分の断層スリップデータを取得した（第6図）。

田瀬露頭 (35°37'39.64"N, 137°28'11.74"E, 標高497 m)

田瀬露頭では、北北西-南南東走向の断層によつ

て東側の苗木-上松花崗岩と西側の第四紀の砂岩礫岩互層が接する（遠田ほか，1994）。主断層面付近では，幅 10 cm ほどの断層ガウジが発達している。ダメージゾーンの幅は露頭全体が破碎しており不明だが，少なくとも 5 m を超える。この露頭で主断層面およびダメージゾーンの断層から 26 条分の断層スリップデータを取得した（第 7 図）。

舞台峠露頭 (35°45'24.09"N, 137°19'51.54"E, 標高 723 m)

舞台峠露頭は，安江・廣内（2002）によって記載された断層露頭から約 90 m 南南東の場所にあり，今回新たに見つけた露頭である。幅 2~3 m，高さ約 5 m の範囲で露頭があり，北北西-南南東走向の断層によって，東側に濃飛流紋岩，西側に第四紀の砂岩礫岩互層が接する（第 8a, b 図）。濃飛流紋岩と第四紀の砂岩礫岩互層の露出状況から，この断層の変位量は少なくとも 2 m を超える。さらに，明瞭な破碎を伴うこと（第 8c 図），周辺地域の断層変位地形のトレース上にあることから，この断層は阿寺断層系の小和知断層の主断層面だと判断した。この露頭で主断層面およびダメージゾーンの断層から 25 条分の断層スリップデータを取得した。

小郷露頭 (35°45'19.27"N, 137°19'54.35"E, 標高 718 m)

小郷露頭では，濃飛流紋岩が露出しており，それを段丘堆積物である礫岩層が覆っている（安江・廣内，2002）。断層は段丘堆積物に変位を与えていることから，第四紀以降に活動した可能性が高い（安江・廣内，2002）。地形および他の断層露頭からわかる小和知断層のトレースから数十 m 離れていることから，副次的な断層とされる（安江・廣内，2002）。この露頭で，主断層面およびダメージゾーンの断層から 9 条分の断層スリップデータを取得した（第 9 図）。

付知露頭 (35°38'18.14"N, 137°27'34.86"E, 標高 539 m)

付知露頭は，狭義の阿寺断層から北東におよそ 100 m 離れた場所にある。破碎された苗木-上松花崗岩が露出しており，小規模な断層が多数発達している（第 10 図）。この露頭で 13 条分の断層スリップデータを取得した。

第 1 表に，取得した全ての断層スリップデータを示す。取得した断層スリップデータのうち，69 条について断層面の方向・すべり方向・すべりセンスのデータを，26 条について断層面の方向とすべり方向のデータをそれぞれ取得した。第 11 図は，断層スリップデータをタンジェント・リニエーション・ダイアグラム (Twiss and Gefell, 1990) で示した。この図では，断層面の極がステレオネットにプロットされ，その

シンボルは下盤のすべり方向を示す矢印で示される。すべりセンスが不明な断層スリップデータは，矢印の代わりにすべり方向を示す線分をシンボルとする (Sato, 2006)。また，本調査で決定した微小地震の発震機構解に基づくスリップデータも一緒に示した。観察した断層群は，北西-南東走向で北東傾斜の左右両センスの横ずれを示すものが多く，逆断層も含まれる（第 11 図）。

5. 微小地震から求めた応力と断層スリップデータとの比較

微小地震から求めた応力（以後，現在の応力と呼ぶ）と露頭で観察した断層スリップデータとの比較の方法は次の通りである。初めに，現在の応力が観察した断層スリップデータの断層面に作用したときの，断層面にかかる最大剪断応力の方向を計算する。次に，計算した最大剪断応力の方向と観察した小断層の実際のすべり方向との角度差（ミスフィット角）を調べる。現在の応力で小断層が動いた場合，ミスフィット角は小さく見積もられることになる。以上の計算を第 4 図の最適応力とその 95% 信頼限界に含まれる応力に対して行った。

第 1 表の断層スリップデータの右端に，ミスフィット角のヒストグラムを示した。断層スリップデータごとにヒストグラムの形が異なることから，断層面の方向によってミスフィット角がとる幅に差があることがわかる。また，すべりセンスが決定したデータはヒストグラムのピークが 1 つだが，すべりセンスが不明のデータは両センスを想定してミスフィット角を計算したため，ピークを 2 つ持つ。議論をわかりやすくするために，第 1 表ではミスフィット角が 30° の場所を赤線で示した。本論ではヒストグラムのピークが 30° 以下の断層スリップデータについて，現在の応力から推定される運動方向と一致するという意味で，応力と調和していると考える。

全ての断層スリップデータのうち，現在の応力と調和するのは 2 割程度（95 データ中 22 データ）である（第 1 表）。これは，調査地域において露頭で観察した断層の多くが現在の応力とは異なる応力ですべったことを示す。しかし，データを細かく見てみると，現在の応力に不調和なデータはダメージゾーンの断層から取得したものがほとんどであり，主断層面から取得した断層スリップデータに限ってみると，その多くが現在の応力と調和する（9 データ中 6 データ）。

また，現在の応力と地表で得られた断層スリップデータの方向の関係について，断層に沿った走向方向の変化はみられない。条線を観察した阿寺断層系の南部と中北部ではその構造が異なり，中北部の方がより複雑である（安江・廣内，2002）。さらに，中北部の小郷の露頭に露出しているのは副次的な断層

とされる。しかし、データ数は少ないものの、主断層面の運動方向と応力との関係では両地域に大きな違いは認められなかった。

6. 議論

6.1 活断層評価手法としての有効性

本研究の結果は、対象とする断層について現在の応力と地表での運動方向との比較が活断層の認定手法として有効であることを支持する。それは、阿寺断層系の地表の主断層面から得られた断層スリップデータの多くが現在の応力と調和するからである。つまり、主断層面から得られた断層スリップデータは、現在の応力から計算される断層面上の最大剪断応力とほぼ平行に運動したとみなすことができる。また、地形や基盤岩の変位から求めた阿寺断層系中央部の累積変位量は、北東側隆起を伴う左ずれを示し (Sugimura and Matsuda, 1965; 山田, 1981), この運動方向は現在の応力から推定される断層の運動方向に対応する。

一方、ダメージゾーンに発達する小断層は、その多くが現在の応力とは調和しない。したがって、阿寺断層系に関しては、ダメージゾーンから取得したスリップデータを現在の応力と単純に比較して活断層の認定に用いることはできない。

6.2 今後の課題

阿寺断層系の主断層面から取得した断層スリップデータの中には現在の応力に不調和なものも含まれている。本論文で提案した活断層認定手法の確立のためには、このようなデータの解釈も不可欠である。例えば、波形インバージョンにより推定された震源モデルでは、断層面上の場所によってすべり方向がばらついたり、すべっている間に向きを変えたりする例が数多く報告されている (Finite-Source Rupture Model Database, <http://www.seismo.ethz.ch/static/sremod/Homepage.html>)。また、一回の地震の間にすべり方向が変わることは地表のデータからも野島断層などで報告がある (大槻ほか, 1997)。現在の応力に不調和なデータは、このようなすべりの不均質を反映したものかもしれない。今後は震源モデルが明らかになっている断層において同様の調査を行い、断層スリップデータの運動方向と震源モデルとの比較・検討を行っていくことが必要である。

また、ダメージゾーンに発達する断層は、多くの場合に主断層面から 10 cm 離れただけで現在の応力と不調和な運動方向を示す。そのメカニズムを明らかにすることも活断層認定手法の確立のためには重要である。例えば、ダメージゾーンの応力場は不均一で、主断層面から離れた場所のスリップデータは数十 cm から数百 m 程度の空間スケールで起こる応力変化を反映しているのかもしれない。阿寺断層系

周辺では主断層面からの距離によって母岩に発達する割れ目の密度や方向が変わり (大嶋ほか, 2003; 大嶋・吉田, 2004; 吉田ほか, 2009), このことがダメージゾーンの不均一な応力場に寄与している可能性がある。あるいは、現在とは異なる過去の応力 (古応力) で運動した方向を断層条線として観察した可能性もある。阿寺断層系は、周辺に貫入する火成岩類の年代や破碎の状況から、始新世には存在していたとされる (山田ほか, 1992)。今回観察した断層スリップデータでは、断層面の産状の系統的な違いや断層活動の前後関係を示す構造にもとづいた活動時代の区分はできなかったが、古応力で活動した断層スリップデータが混在している可能性は否定できない。

本研究で提案した手法の有効性を評価するためには、上記の課題を踏まえ阿寺断層系以外の断層も含めたデータの蓄積が重要である。例えば、地層の変位などから活断層でないことが明らかな断層、活動履歴が第四紀以降に限られる断層、最近の地震によって地表を変位させた断層などを対象とした調査が必要である。複数の断層から取得したデータを比較することで、地下と地表との運動方向の関係を見出すことにつながると期待される。また、ダメージゾーンの応力場の理解には、主断層面からの距離と断層スリップデータの関係をより詳細にみた調査や、応力の空間変化を計算した数値シミュレーションとの比較などが有効だと考えられる。

謝辞 微小地震の解析には気象庁・文部科学省が協力して処理した気象庁一元化データ (使用データ提供機関: 防災科学技術研究所 Hi-net, 気象庁, 東京大学, 名古屋大学, 京都大学) を使用させていただきました。発震機構解の推定においては、東京大学の井出哲博士が作成したプログラムを参考にさせていただきました。本研究を進めるにあたり、産業技術総合研究所地質情報研究部門の伊藤順一氏、宮城磯治氏、大坪誠氏、西来邦章氏、山口直文氏、城谷和代氏に有益な議論をしていただきました。民宿「沓掛乃湯」の林夫妻には、野外調査の際に大変お世話になりました。原稿をまとめる際には、加瀬祐子博士、桑原保人博士に有益なコメントを頂きました。以上の方々に感謝申し上げます。

文 献

- Caine, J. S., Evans, J. P., Forster, C. B. (1996) Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1025-1028, doi: 10.1130/0091-7613(1996)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2.
- Frohlich, C. (1992) Triangle diagrams: Ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 75, 193-198, doi:10.1016/0031-9201(92)90130-N.

- 平野信一 (1981) 阿寺断層第四紀後期の断層活動と地震発生予測. 月刊地球, 3, 250-256.
- 今西和俊・長 郁夫・桑原保人・平田 直・Panayotopoulos, Y. (2006) 糸魚川-静岡構造線活断層系中・南部域における微小地震の発震機構解. 活断層・古地震研究報告, No.6, 55-70.
- Imanishi, K., Kuwahara, Y., Takeda, T., Haryu, Y. (2006) The seismicity, fault structures, and stress field in the seismic gap adjacent to the 2004 mid-niigata earthquake inferred from seismological observations. *Earth Planets and Space*, 58, 831-841.
- Imanishi, K., Kuwahara, Y., Takeda, T., Mizuno, T., Ito, K., Wada, H., Haryu, Y. (2011) Depth-dependent stress field in and around the Atotsugawa fault, central Japan, deduced from microearthquake focal mechanisms: Evidence for localized aseismic deformation in the downward extension of the fault. *Journal of Geophysical Research*, 116, B01305, doi:10.1029/2010JB007900.
- 活断層研究会編 (1991) 新編日本の活断層一分布図と資料一. 東京大学出版会, 437p.
- Michael, A. J. (1987) Use of focal mechanisms to determine stress - A control study. *Journal of Geophysical Research*, 92, 357-368, doi:10.1029/JB092iB01p00357.
- Niwa, M., Mizuochi, Y., Tanase, A. (2009) Reconstructing the evolution of fault zone architecture: Field-based study of the core region of the Atera Fault, Central Japan. *Island Arc*, 18, 577-598, doi:10.1111/j.1440-1738.2009.00674.x.
- 岡田篤正 (1981) 活断層としての阿寺断層. 月刊地球, 3, 372-382.
- 岡田篤正・松田時彦 (1976) 岐阜県東部, 小野沢峠における阿寺断層の露頭と新期断層運動. 地理学評論, 49, 632-639.
- 岡田篤正・栗田泰夫・奥村晃史・東郷正美 (1987) トレンチ発掘調査による阿寺断層系萩原断層の活動時期と間隔の解明. 地学雑誌, 96, 322-325.
- 大嶋章浩・吉田英一 (2004) 活断層周辺岩盤の割れ目と化学組成の変化一岐阜県付知地域の阿寺断層による事例研究一. *Proceedings of the 14th Symposium on Geo-Environments and Geotechniques*, 1-10.
- 大嶋章浩・吉田英一・安藤賢一 (2003) 阿寺断層周辺に分布する花崗岩体における割れ目解析一断層運動の影響範囲の検討一. *Proceedings of the 13th Symposium on Geo-Environments and Geotechniques*, 241-246.
- 大槻憲四郎・皆川 潤・青野正夫・大竹政和 (1997) 兵庫県南部地震時に刻まれた野島断層の湾曲した断層条線について. 地震第2輯, 49, 451-460.
- Sato, K. (2006) Incorporation of incomplete fault-slip data into stress tensor inversion. *Tectonophysics*, 421, 319-330, doi:10.1016/j.tecto.2006.05.004.
- Sugimura, A., Matsuda, T. (1965) Atera fault and its displacement vectors. *Geological Society of America Bulletin*, 76, 509-522, doi:10.1130/0016-7606(1965)76[509:AFAIDV]2.0.CO;2.
- 遠田晋次・井上大栄・高瀬信一・久保内明彦・富岡伸芳 (1994) 阿寺断層の最新活動時期：1586 年天正地震の可能性. 地震, 47, 73-77.
- 遠田晋次・井上大栄・久保内明彦・高瀬信一・二階堂学 (1995) 阿寺断層系の活動と 1586 年天正地震：小郷地区, 青野原地区, 伝田原地区トレンチ掘削調査. 地震, 48, 401-421.
- 佃 栄吉・栗田泰夫・山崎晴雄・杉山雄一・下川浩一・水野清秀 (1993) 2.5 万分の 1 阿寺断層系ストリップマップ説明書. 地質調査所, 39p.
- Twiss, R. J., Gefell, M. J. (1990) Curved slickenfibers - a new brittle shear sense indicator with application to a sheared serpentinite. *Journal of Structural Geology*, 12, 471-481, doi:10.1016/0191-8141(90)90035-W.
- 山田直利 (1978a) 阿寺断層を追って (その 1), 恵那山トンネルから付知まで. 地質ニュース, 283, 37-49.
- 山田直利 (1978b) 阿寺断層を追って (その 2), 付知から飛騨川まで. 地質ニュース, 284, 30-36.
- 山田直利 (1981) 阿寺断層一その地質学的背景一. 月刊地球, 3, 237-243.
- 山田直利・脇田浩二・広島俊男・駒沢正夫 (1990) 20 万分の 1 地質図幅「飯田」, 地質調査所.
- 山田直利・柴田 賢・佃 栄吉・内海 茂・松本哲一・高木秀雄・赤羽久忠 (1992) 阿寺断層周辺地域の火成岩類の放射年代と断層活動の時期. 地質調査所月報, 43, 759-779.
- 山路 敦 (2001) 新しい小断層解析. 地質学雑誌, 107, 461-479.
- 安江健一・廣内大助 (2002) 阿寺断層系中北部の第四紀後期における活動性と構造発達様式. 第四紀研究, 41, 347-359.
- 吉田英一・大嶋章浩・吉村久美子・長友晃夫・西本昌司 (2009) 断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴一阿寺断層における「ダメージゾーン」解析の試み一. 応用地質, 50, 16-28.

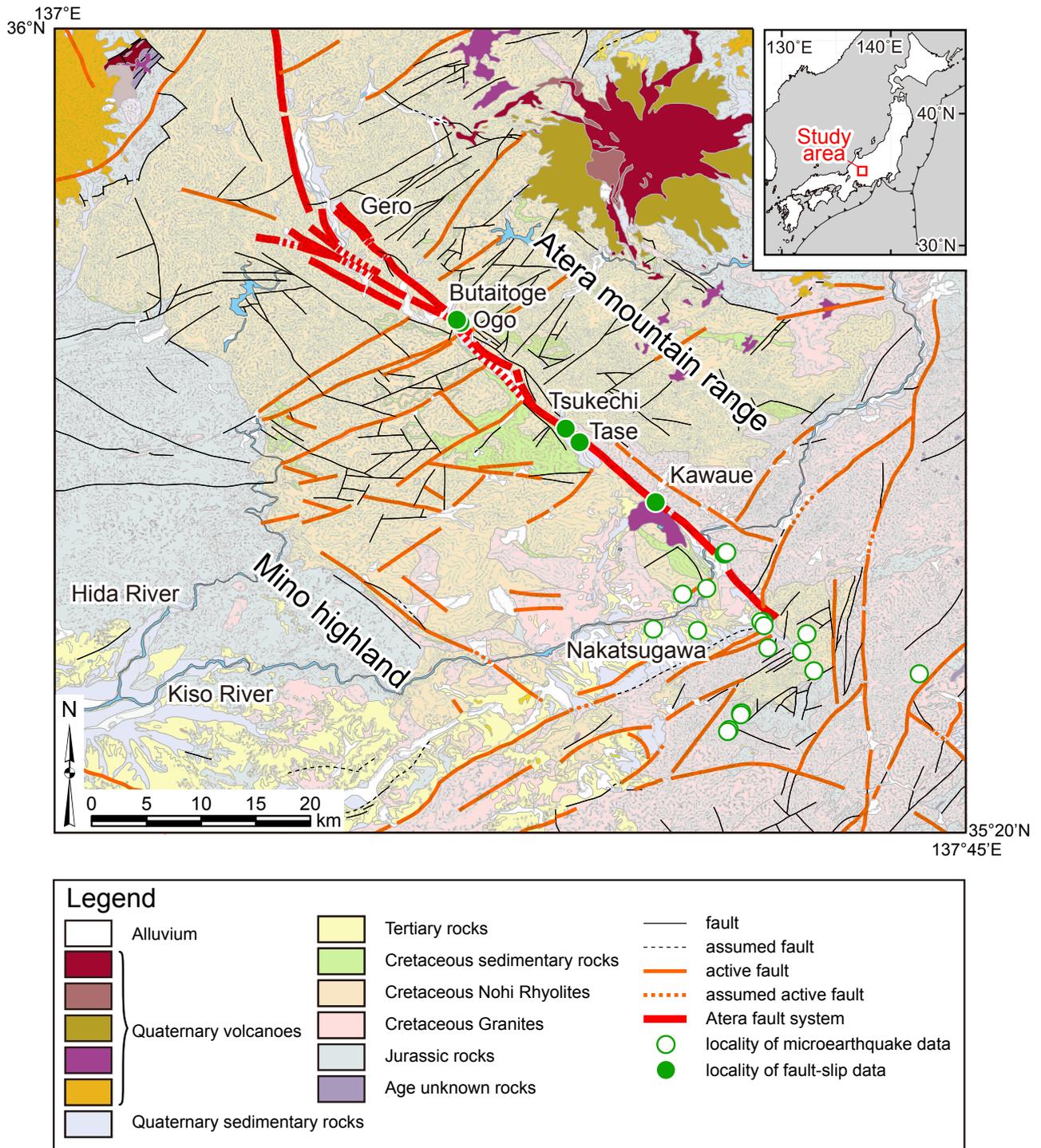
(受付: 2011 年 7 月 29 日, 受理: 2011 年 10 月 24 日)

第 1 表. 阿寺断層系から取得した断層スリップデータ. 微小地震データから決めた応力解とのミスフィット角のヒストグラムも示した. ヒストグラムのピークが 30° 以下のデータは影をつけた. D は主断層面からの距離.

Table 1. Fault-slip data from the Atera fault system. Misfit angles from the optimal stress tensor determined by the stress tensor inversion of microearthquake data are showed. Data with peaks of misfit angles smaller than 30° are shaded. Abbreviation: D, distance from main fault plane.

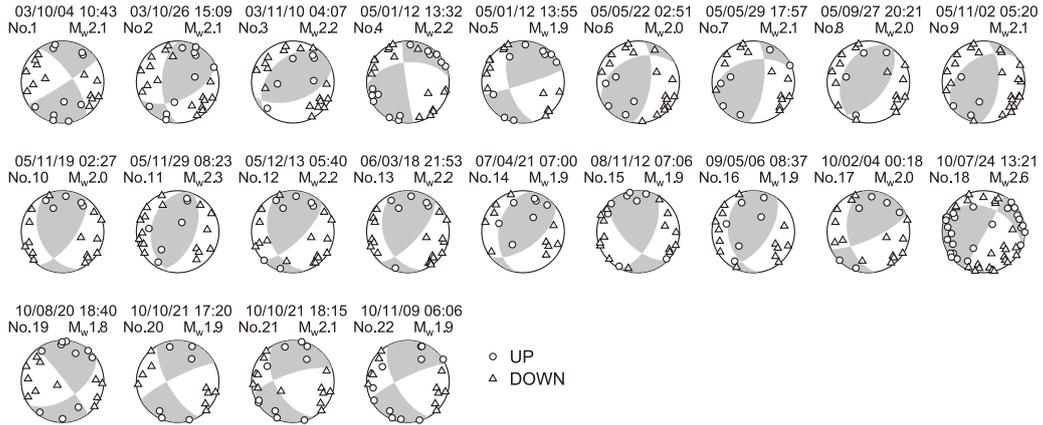
Fault plane(°) Slickenline(°)								Fault plane(°) Slickenline(°)													
No.	Locality	Type	Dip direction	Dip	Dip direction	Dip	Sense	D(m)	Misfit angles(°)	No.	Locality	Type	Dip direction	Dip	Dip direction	Dip	Sense	D(m)	Misfit angles(°)		
23	Kawaue	F	41	81	321	50	S	0.6		73	Butai-toge	L	70	82	357	66	U	1.0			
24	Kawaue	F	247	66	281	61	S	2.0		74	Butai-toge	L	51	85	105	82	U	1.0			
25	Kawaue	F	40	27	87	19	D	2.0		75	Butai-toge	L	96	38	60	32	U	1.0			
26	Kawaue	F	49	89	136	51	S	0.7		76	Butai-toge	L	101	41	72	38	U	1.0			
27	Kawaue	F	352	60	263	2	D	1.8		77	Butai-toge	L	77	29	70	29	U	1.0			
28	Kawaue	F	212	37	284	12	D	1.1		78	Butai-toge	F	56	66	106	55	N	1.5			
29	Kawaue	L	332	20	34	9	U	1.0		79	Butai-toge	F	320	66	237	17	S	1.5			
30	Kawaue	L	203	86	289	45	U	0.1		80	Butai-toge	F	85	34	355	0	S	2.5			
31	Kawaue	F	344	86	254	13	S	1.2		81	Butai-toge	F	125	56	36	2	D	2.5			
32	Kawaue	L	13	68	303	40	U	0.4		82	Butai-toge	L	340	83	258	50	U	2.5			
33	Kawaue	L	34	83	305	9	U	0.6		83	Butai-toge	F	57	79	141	25	S	0.0			
34	Kawaue	F	24	63	109	8	D	0.0		84	Butai-toge	F	88	80	177	1	D	2.5			
35	Kawaue	F	56	60	134	29	S	2.0		85	Butai-toge	F	89	75	3	16	D	2.0			
36	Kawaue	L	1	72	278	22	U	1.0		86	Butai-toge	F	78	67	76	3	D	2.0			
37	Kawaue	F	57	60	134	21	S	0.5		87	Butai-toge	F	54	68	140	9	D	2.0			
38	Kawaue	F	72	84	159	27	D	2.0		88	Butai-toge	F	90	34	15	10	S	2.0			
39	Kawaue	L	185	89	275	25	U	1.3		89	Butai-toge	L	69	56	46	53	U	2.0			
40	Kawaue	F	193	82	109	40	S	0.5		90	Butai-toge	L	61	27	58	26	U	2.0			
41	Kawaue	L	199	69	152	61	U	0.7		91	Butai-toge	F	76	32	161	2	D	2.0			
42	Kawaue	F	196	74	136	61	D	0.8		92	Butai-toge	F	292	53	355	30	D	2.0			
43	Kawaue	F	187	70	105	22	S	0.3		93	Butai-toge	F	38	74	303	15	S	0.0			
44	Kawaue	F	226	83	303	62	S	0.4		94	Butai-toge	F	97	77	16	37	R	0.2			
45	Tase	F	38	89	308	5	S	0.0		95	Butai-toge	F	111	80	22	7	D	0.3			
46	Tase	F	49	36	319	0	S	0.2		96	Ogo	F	30	80	300	4	S	0.5			
47	Tase	L	319	53	327	49	U	2.5		97	Ogo	F	297	74	224	45	D	0.5			
48	Tase	L	184	38	219	32	U	2.0		98	Ogo	F	54	76	122	56	R	0.5			
49	Tase	F	42	63	37	62	R	0.4		99	Ogo	L	9	65	16	65	U	0.5			
50	Tase	L	353	89	263	17	U	0.4		100	Ogo	F	63	82	131	69	N	0.5			
51	Tase	F	353	60	289	37	R	0.4		101	Ogo	F	65	80	152	17	S	0.5			
52	Tase	F	27	60	302	8	S	0.4		102	Ogo	F	52	86	139	34	S	0.5			
53	Tase	F	36	75	334	61	R	0.6		103	Ogo	F	17	76	292	20	S	0.0			
54	Tase	L	67	85	150	56	U	0.5		104	Ogo	F	19	65	289	2	S	0.8			
55	Tase	L	30	72	303	10	U	0.0		105	Tsukechi	L	87	56	175	2	U	100			
56	Tase	F	17	47	285	1	S	1.0		106	Tsukechi	F	324	45	9	35	R	100			
57	Tase	F	31	63	113	13	S	0.0		107	Tsukechi	F	158	63	81	24	S	100			
58	Tase	F	62	54	23	47	R	0.6		108	Tsukechi	F	254	78	247	78	N	100			
59	Tase	L	67	50	120	35	U	0.5		109	Tsukechi	F	70	90	160	12	S	100			
60	Tase	F	40	68	26	68	R	0.5		110	Tsukechi	F	337	46	336	46	R	100			
61	Tase	L	29	69	347	63	U	2.0		111	Tsukechi	F	51	28	341	10	S	100			
62	Tase	F	357	90	86	6	D	0.4		112	Tsukechi	F	80	60	357	12	S	100			
63	Tase	L	358	45	296	31	U	0.1		113	Tsukechi	F	337	76	66	1	D	100			
64	Tase	F	39	79	124	21	S	0.4		114	Tsukechi	F	76	76	349	14	S	100			
65	Tase	F	42	84	324	66	R	0.4		115	Tsukechi	F	323	46	339	44	N	100			
66	Tase	F	6	69	291	34	R	0.4		116	Tsukechi	F	169	69	76	0	D	100			
67	Tase	F	26	42	359	38	N	0.4		117	Tsukechi	F	39	47	336	26	S	100			
68	Tase	F	49	80	135	16	S	0.0													
69	Tase	F	56	81	137	23	S	0.0													
70	Tase	F	7	67	94	6	S	1.2													
71	Butai-toge	L	71	83	18	80	U	1.0													
72	Butai-toge	F	60	80	341	50	N	1.0													

Legend
 55 Fault slip data on the main fault plane
 56 Fault slip data from damage zone



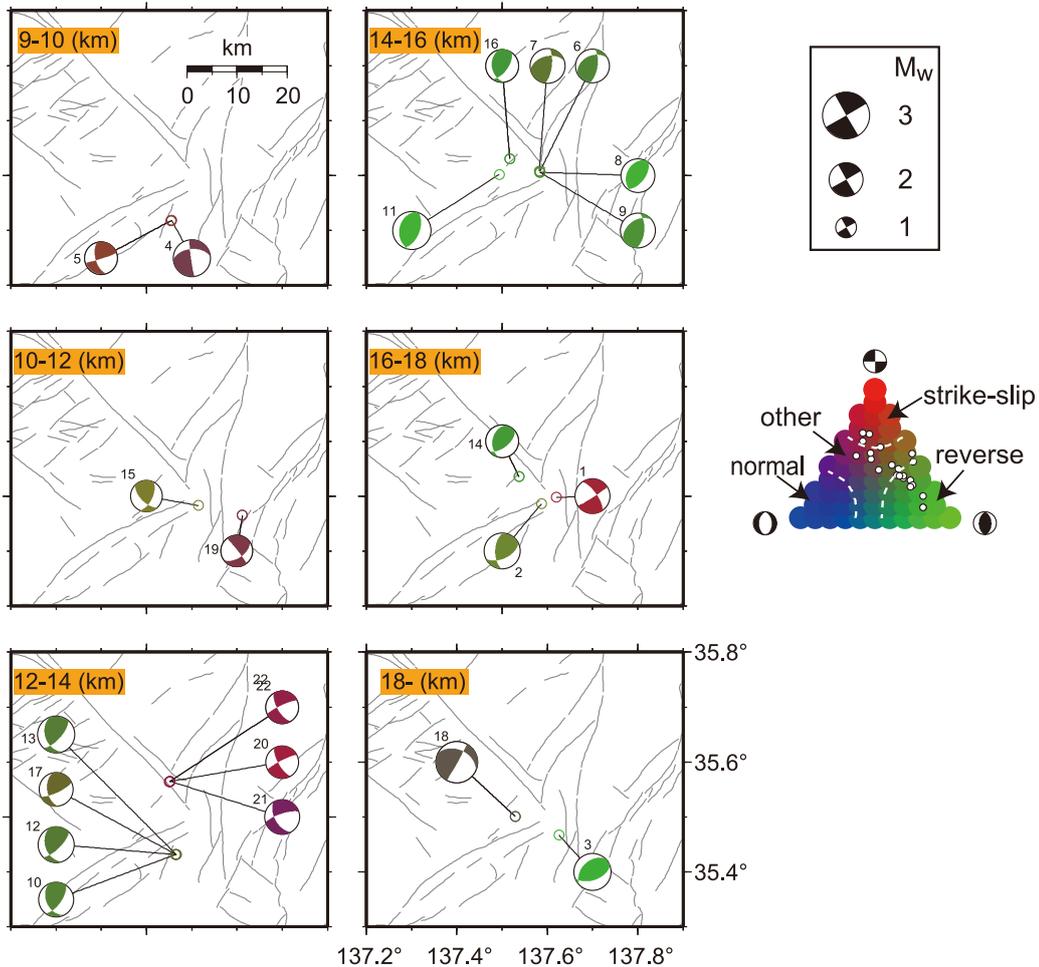
第1図. 調査地域の地質図. 山田ほか (1990), 活断層研究会編 (1991) をもとに作成. 微小地震データおよび断層スリップデータを取得した位置を示す.

Fig. 1. Geologic map of the study area after Yamada et al. (1990) and The Research Group for Active Faults of Japan (1991), showing locations of microearthquakes and fault-slip data.



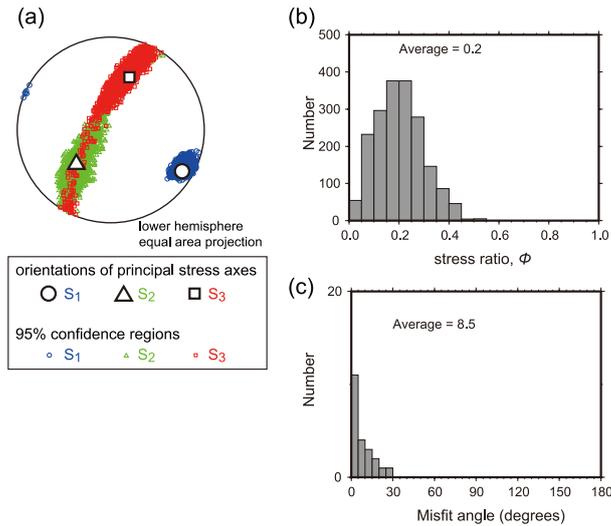
第2図. 微小地震データの解析結果 (下半球等積投影). P波初動の押しを丸で, 引きを三角で示す. 発生時刻 (LT), イベント番号, モーメントマグニチュードを各ビーチボールの上に示す.

Fig. 2. Focal mechanism solutions of all events determined in the present study (lower hemisphere of equal-area projection). The circles and triangles represent compressional and dilatational first motions, respectively. Origin time (LT), event number, and moment magnitude are shown above each beach ball.



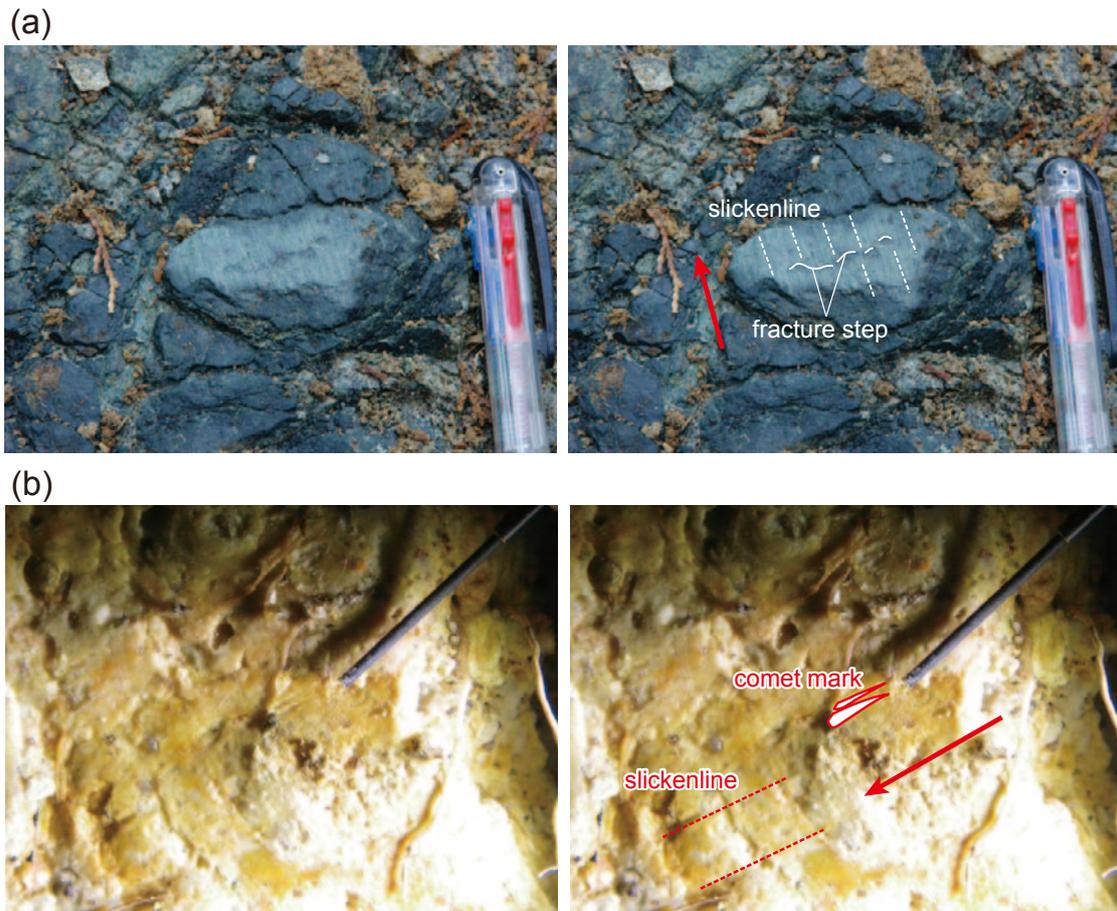
第3図. 深さごとの発震機構解分布 (下半球等積投影). 発震機構解は横ずれ成分 (赤), 逆断層成分 (緑), 正断層成分 (青) それぞれの強さの比率に応じて色分けをしている. 各ビーチボールパターンにつけた番号は第2図の発震機構解の番号と対応する. 右の三角ダイアグラムは断層のタイプごとに色分けしたもの (Frohlich, 1992) で, 発震機構解は白丸で示した.

Fig. 3. Spatial distribution of focal mechanism solutions in six different depth ranges (lower hemisphere of equal-area projection), where different colors are used to differentiate strike-slip (red), reverse (green), and normal faulting mechanisms. The numbers adjacent to each beach ball correspond to the event number in Fig. 2. A triangle diagram (Frohlich, 1992) with color scale is shown on the right. Each focal mechanism is plotted by open circles.



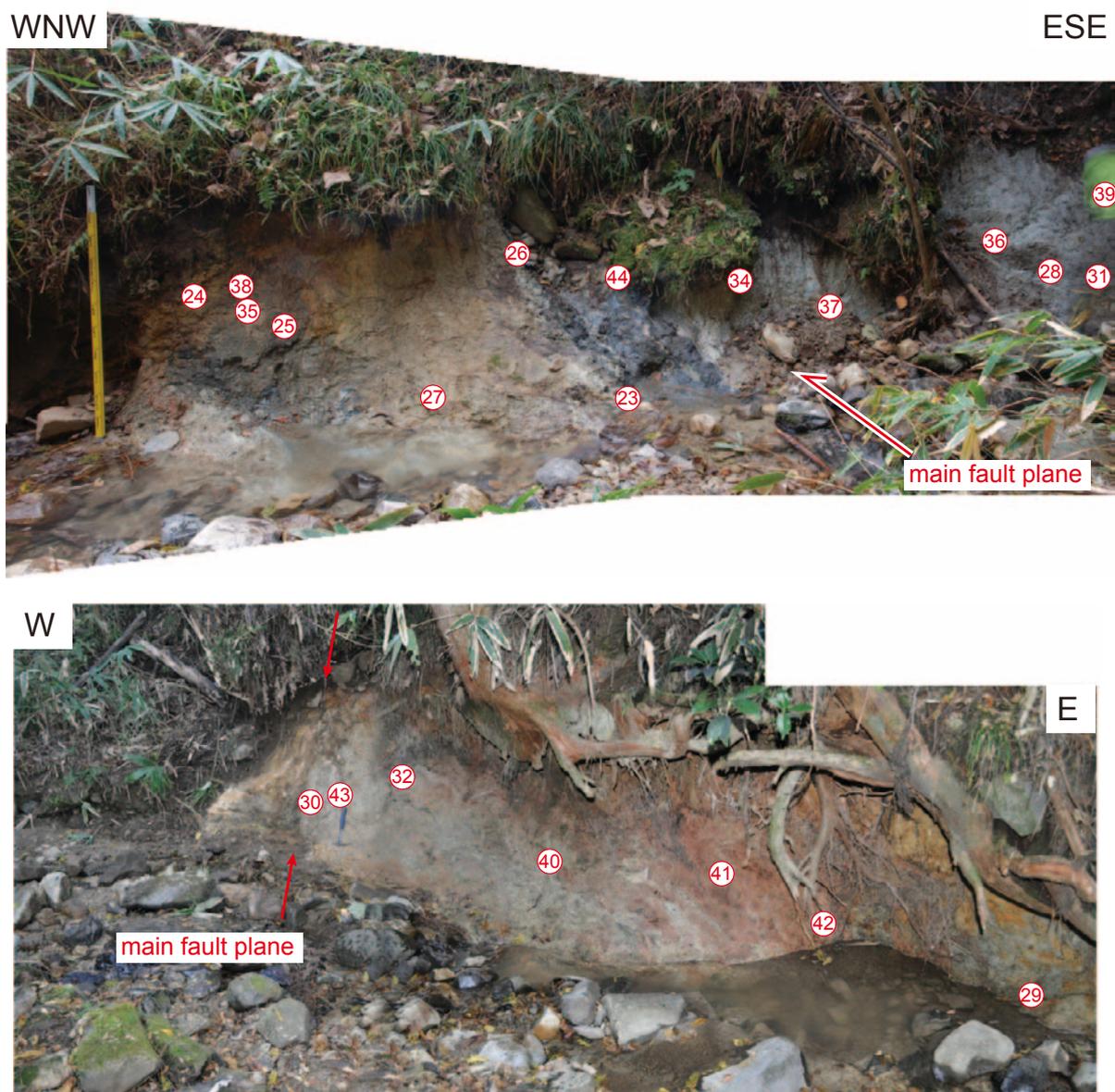
第4図. 応力逆解析の結果. (a) 主応力軸方向を95%信頼限界つきで下半球等積投影に示した図. (b) 応力比のヒストグラム. (c) 最適応力に対する微小地震データのミスフィット角. ミスフィット角は最適応力のもとで断層面にはたらく剪断応力の方向と実際の断層面のすべり方向との角度差とする.

Fig. 4. Stress tensor inversion results in the study area. (a) Principal stress axes with their 95% confidence regions plotted on lower hemisphere stereonets. (b) Frequency of the stress ratio which belongs to the 95% confidence region. (c) Misfit angles for the data with respect to the optimal stress tensor determined by the stress tensor inversion. Here, the misfit angle represents the angle between the tangential traction predicted from the optimal stress and the observed slip direction on each plane determined from the focal mechanism.



第5図. (a) 断層破砕帯に発達する断層条線. 赤い矢印は、条線の構造から判断した写真手前側の岩盤のすべり方向を表わす. (b) 断層面上についた非対称構造. 写真中央部にある砂粒から右上に彗星の尾っぽのように条線が延びている. 赤い矢印は、条線の構造から判断した写真手前側の岩盤のすべり方向を表わす. 右上の黒い棒は直径0.5 mmのシャープペンシルの芯.

Fig. 5. (a) Fault striations on a fault surface of fracture zone. A red arrow indicates the slip direction of the fault plane shown by slickenlines and secondary fractures. (b) Fault striations on a fault surface. There are comet-like structures heading left below. A red arrow indicates the slip direction of the fault surface. A black bar of upper right is a mechanical pencil lead of 0.5 mm diameter.

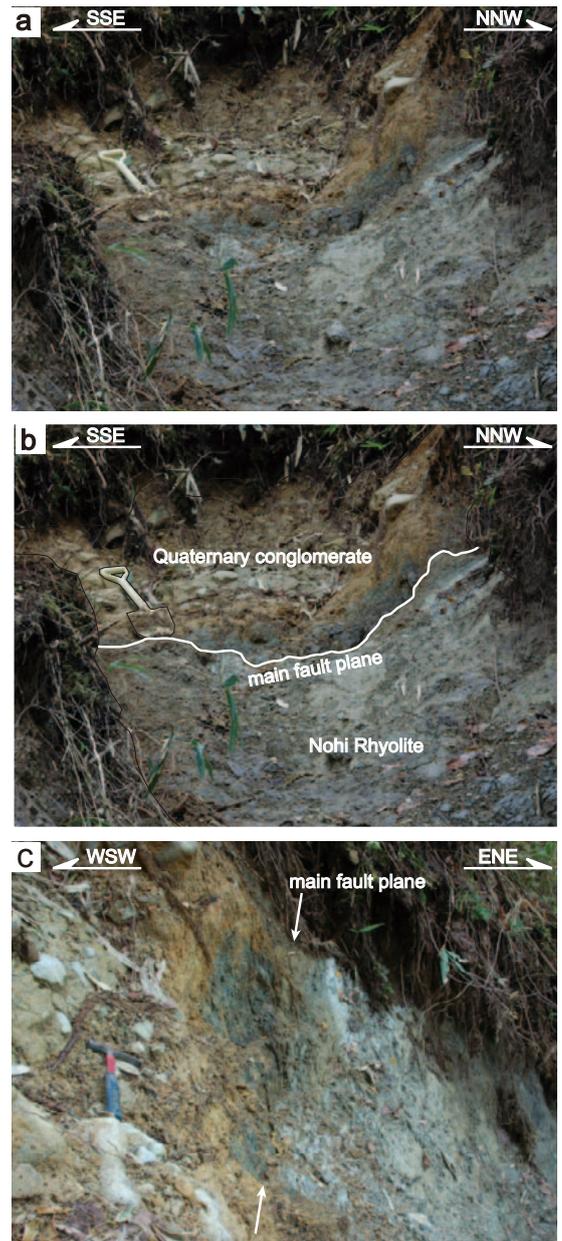


第6図. 川上地域に見られる阿寺断層系の露頭写真. 断層スリップデータを取得した位置を示す.
Fig. 6. Photograph of the Atera fault system in Kawaue area, showing locations of fault-slip data.



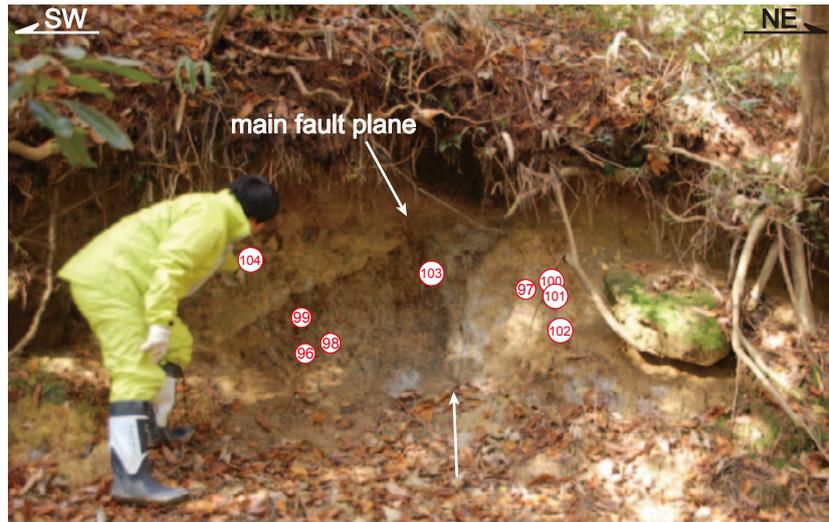
第7図. (a) 田瀬地域に見られる阿寺断層系の露頭写真. (b) aに主断層面, 断層スリップデータを取得した位置を書きこんだ図.

Fig. 7. (a) Photograph of the Atera fault system in Tase area. (b) Locations of main fault plane and fault-slip data of (a).



第8図. (a) 舞台峠に見られる阿寺断層系の露頭写真. (b) aに主断層面の位置を書きこんだ図. (c) 舞台峠に見られる阿寺断層系の露頭写真. aと同じ露頭を別の角度から撮影したもの.

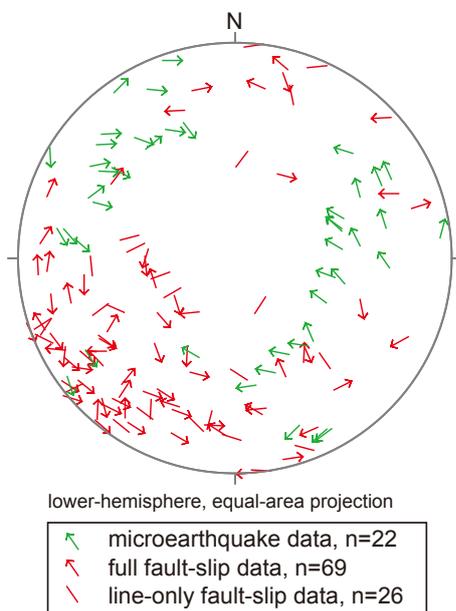
Fig. 8. (a) Photograph of the Atera fault system in Butaitoge area. (b) Locations of main fault plane of (a). (c) Photograph of fault which is same locality and different view angle of (a).



第9図. 小郷地域に見られる阿寺断層系の露頭写真. 断層スリップデータを取得した位置を示す.
 Fig. 9. Photograph of the Atera fault system in Ogo area, showing locations of fault-slip data.



第10図. 付知地域に見られる断層近傍露頭. 破碎された苗木-上松花崗岩が露出する.
 Fig. 10. Photograph of fracture zone of the Atera fault system in Tsukechi area.



第11図. 阿寺断層系から取得した断層スリップデータと微小地震データを示したタンジェント・リニエーション・ダイアグラム. 下半球等積投影.
 Fig. 11. Tangent-lineation diagram of fault-slip and microearthquake data in the study area. Lower hemisphere of equal-area projection.