

2011年東北地方太平洋沖地震の震源域における正しい応力場の推定 応力インバージョンにおけるデータセット抽出基準の重要性 Proper estimation of stress fields in the source region of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake

今西 和俊^{1*}, 桑原 保人¹

IMANISHI, Kazutoshi^{1*}, KUWAHARA, Yasuto¹

¹ 産業技術総合研究所

¹ Geological Survey of Japan, AIST

2011年東北地方太平洋沖地震では海溝軸付近で数10mを超えるすべりが起こったことが様々な観測データから明らかになってきた。これだけ大きなすべりを起こす歪が蓄積されていたとすると周辺の応力場に顕著な空間変化が存在していたことが期待される。本研究では使用するデータセットを適切に選ぶことで、このような応力場の空間変化が検出できることを報告する。

応力テンソルインバージョンにより応力場を推定する場合、含まれるメカニズム解にはある程度のばらつきがあることが必要とされる。Hardebeck and Hauksson (2001) の数値実験によると、データセットのほとんどがある断層面に沿った類似のメカニズム解であった場合、真の応力場がどうであれ、最大主応力軸が断層面に対して約45度の角度を持つ結果が推定されてしまうことが示されている。本研究で対象とする東北地方太平洋沖ではプレート境界面で発生する低角逆断層型地震が多いことから、使用するデータセットに注意を払わないと誤った結果が推定されてしまうことになる。

我々はこの問題点を解決するため、Frohlich (1992) による断層タイプの分類、Kagan angle (Kagan, 1991)、震源の深さの情報を用い、プレート境界面で発生している地震 (On-fault 地震) とそれ以外の地震 (Off-fault 地震) に分類することを試みた。具体的には、(1) Frohlich (1992) による断層タイプが逆断層型、(2) 低角逆断層型地震 (走向 195°、傾斜角 15°、すべり角 90°) との間の Kagan angle が 35 度以下、(3) 震源がプレート境界面から ±10km の間に存在、という3つの条件をすべて満たした地震を On-fault 地震、それ以外を Off-fault 地震と定義した。この分類を 1997年2月から 2011年東北地方太平洋沖地震が発生する直前までの防災科学技術研究所の F-net モーメントテンソル解に適用したところ、およそ半数が On-fault 地震と認定された。On-fault 地震のメカニズム解の走向と傾斜角はプレート境界面の形状とも調和的であり、上記の条件がうまく機能したことが伺える。Off-fault 地震は様々なメカニズム解から構成されており、正断層タイプの地震も多く含まれる。

次に対象地域をいくつかの領域に分割し、それぞれの領域に含まれる Off-fault 地震を用いて応力テンソルインバージョン (Michael, 1984) を実施した。2011年東北地方太平洋沖地震で大きなすべりを生じた領域においては、最大主応力軸はほぼ水平面内に作用していたことがわかった。最大主応力軸の推定誤差を考慮すると、プレート境界面に対して 10~40°ほどの角度を持って作用している。一方、それ以外の領域では最大主応力軸がプレート境界面に対して高角に作用していたことがわかった。特に茨城県沖ではほぼ直交している。このように、大きなすべりを生じた領域にはある程度のせん断応力が掛かっていたのに対し、それ以外の領域ではせん断応力が非常に小さかったことが明らかになった。また、比較のために On-fault 地震を使って同様の解析を行ってみたところ、どの領域においてもプレート境界面に対して最大主応力軸が約 45 度で作用するという結果が推定された。これは Hardebeck and Hauksson (2001) の数値実験が示しているように、データセットが適切でないことに起因した誤った応力場であると言える。

なお、発表においては、主応力軸の空間変化が生じる要因、本震発生後の応力場との関係についても報告する予定である。

謝辞：防災科学技術研究所の F-net モーメントテンソル解を利用させていただきました。

引用文献：

Frohlich, C. (1992), Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanism, *Phys. Earth Planet. Interiors.*, 75, 193-198.

Hardebeck, J. L., and E. Hauksson (2001), Crustal stress field in southern California and its implications for fault mechanics, *J. Geophys. Res.*, 106, 21,859-21,882, doi:10.1029/2001JB000292.

Kagan, Y. Y. (1991), 3-D rotation of double-couple earthquake sources, *Geophys. J. Int.*, 106, 709-716.

Michael, A. J. (1984), Determination of stress from slip data: faults and folds, *J. Geophys. Res.*, 89 (B13), 11,517-11,526.

キーワード: 応力テンソルインバージョン, 2011年東北地方太平洋沖地震, データセット抽出基準

Keywords: stress tensor inversion, 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake, data-set selection criteria

誘発地震活動域における応力場の特徴 ~ 茨城県北部・福島県南東部 ~ Stress field of normal-faulting seismic sequences in Ibaraki and Fukushima Prefectures triggered by the Mw9.0 Tohoku-oki

加藤 愛太郎^{1*}, 五十嵐 俊博¹, 酒井 慎一¹, 小原 一成¹, 武田 哲也², 飯高 隆¹, 岩崎 貴哉¹, 東北地方太平洋沖地震合同観測グループ¹

KATO, Aitaro^{1*}, IGARASHI, Toshihiro¹, SAKAI, Shin'ichi¹, OBARA, Kazushige¹, TAKEDA, Tetsuya², IIDAKA, Takashi¹, IWASAKI, Takaya¹, Group for the aftershock observations of the 2011 Tohoku-oki Earthquake¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 防災科学技術研究所

¹ERI University of Tokyo, ²National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

The 2011 M9.0 Tohoku-Oki Earthquake triggered widespread seismicity throughout the Japanese island arc including Hokkaido and Kyushu regions. In particular, a significant increase in the shallow seismicity was observed in the minutes following the main-shock along the Pacific coast of NE Japan, notably the northern part of Ibaraki Prefecture and the southern part of Fukushima Prefecture. The most striking feature of the induced seismicity is that the focal mechanisms reveal normal faulting with a T-axis orientated in a roughly E-W direction. Several large magnitude events including the maximum 7.0 earthquake have occurred during the sequence. It is very important to understand the stress field of driving such intensive seismic swarm activities.

We have, therefore, conducted a series of temporary seismic observations through a dense deployment of about 60 portable stations after outbreak of the intensive seismic swarm. We manually picked polarity of first motion of P-wave observed at each seismic station. Then, we have determined focal mechanism of earthquakes applying the method developed by Hardebeck and Shearer [2002] to the first motion data.

Most of the determined focal mechanisms at depths shallower than 10 km show normal faulting with a vertical P-axis. It is interesting that the orientation of T-axis shows spatial variation. The T-axis at the northern part of the Ibaraki is roughly oriented ENE-WSW. The T-axis at the southeast part of the Fukushima is roughly oriented NEN-SWS. In contrast, focal mechanisms at depths greater than 15 km are complex. They consist of normal-, reverse- and strike-slip faulting.

2011年東北地方太平洋沖地震に伴う東北地方北部での応力場の時間変化 Temporal change in stress field in the northern part of Tohoku district associated with the 2011 Tohoku-oki Earthquake

小菅 正裕^{1*}

KOSUGA, Masahiro^{1*}

¹ 弘前大学理工学研究科

¹ Graduate School of Sci. & Tech., Hirosaki Univ.

We have investigated the stress field in the northern part of Tohoku district for the both periods before and after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku (Tohoku-oki) Earthquake. We determined focal mechanisms using data of P-wave first motion, then estimated stress field by a stress tensor inversion method. After the Tohoku-oki earthquake, the seismicity is quite high in Akita prefecture, forming newly activated three major clusters and many minor ones. The location of major clusters is complementary for the periods before the Tohoku-oki earthquake. Seismicity in some clusters started almost immediately after the Tohoku-oki earthquake, however, beginning was delayed even for months in some clusters, and the duration of activity is highly variable among the clusters. Focal mechanisms of earthquakes in the new clusters show predominantly strike-slip or oblique-slip solutions with consistently NW-SE trending T-axis. The stress tensor inversion using focal mechanism data indicates clear temporal change in the stress field due to the Tohoku-oki earthquake, from reverse-faulting regime to strike-slip regime. Thus the new stress field brought the quiescence of seismicity in the former clusters with predominantly reverse faulting, which is consistent with the Coulomb stress calculation. This change is explained qualitatively by the static stress change due to the slip of megathrust of Tohoku-oki earthquake; compressional stress in WNW-ESE direction was reduced by the slip. However, the spatiotemporal variation in seismicity and focal mechanisms suggest the need of additional factors to bring temporal change. Possible factors are, for example, fluid migration in the crust following the static stress change, delayed response of crustal materials, and viscoelastic response in the lower crust and uppermost mantle.

Acknowledgments

We used hypocentral parameters of the JMA catalog that was prepared by the JMA and the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology in Japan. The hypocenters of the catalog were determined by the data of JMA, NIED, Hirosaki University, Tohoku University, Hokkaido University, University of Tokyo, and Aomori Prefecture. We thank these institutions for providing waveform data used for the determination of focal mechanisms.

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 誘発地震, 震源メカニズム, 応力場, 時間変化

Keywords: Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, induced seismicity, focal mechanisms, stress field, temporal variation

ユタ州中央部ワサッチ活断層系周辺のネオテクトニクス (紹介)

Introduction of neotectonics and crustal extension in the Wasatch active fault zone, Utah: Review

小川 勇二郎^{1*}, ロン ハリス²
OGAWA, Yujiro^{1*}, Ron Harris²

¹なし, ²ブリガム・ヤング大学
¹none, ²Brigham Young University

合衆国ユタ州の中央部は、現在はベイスンアンドレインジ地域 (BRP) の東端に位置し、先カンブリア代から中生代までの地層や岩石、新生代の火成岩類 (第四紀の火山岩を含む) が分布し、新生代以降の東西の伸張テクトニクスが始まるまでは、中生代の浅海・陸生層の堆積からコロラド高原の現出、白亜紀を中心としたセビア褶曲スラスト帯の発達、白亜紀・古第三紀のララマイド変動などが重なっていた地域である。この地域のテクトニクスは、白亜紀中心の側方短縮テクトニクスと中新世から始まった側方伸張テクトニクスが見られ、日本のテクトニクスと奇しくも一致する。

ワサッチ活断層系はアイダホ州境界から南へ続き、ユタ州中央部でいったん途切れるが、セントジョージからラスベガス方面へのハリケーン断層系へと連続する全長 600 km におよぶ正断層活断層帯である。興味深いことに、この断層系の周辺では新生代中期から第四紀の玄武岩・流紋岩の火山活動が盛んで、多数の火山、ストック、岩脈が多くの個所で見られる。岩脈の入るユタ州中南部は、活断層の活動はむしろ低調であり、東西伸張歪が岩脈の貫入で解消されている可能性 (Ron Harris の発案) もある。ワサッチ活断層系は南北に少なくとも 10 のセグメント (各約 30-70 km 長さ) に分かれ、それぞれに地形地質調査、サイズミックプロファイル、トレンチ、GPS などにもとづく研究により、地震断層の履歴や活動史、セグメント間の連動の可能性などが詳しく明らかにされている (MacCalpin, 2009 2nd ed., Hintze & Cowallis, 2009 ほか)。我々は、Brigham Young 大学、Utah 大学のグループとともに、ユタ湖 (グレイトソルト湖南方; ただし、淡水) のコアリングなどにもとづくパレオサイズモロジカルな研究であるが (別途報告) 今回はこの周辺のテクトニクスを中心に、従来の研究をレビューし今後の展望を述べたい。

GPS による変位は BRP 東部では平均して 2-3 mm/yr とされているが、ワサッチ活断層系を挟んで急変し、ここが歪集中帯であることが分かる。各セグメントで約 1200-1500 年の再来周期 (M7 以上; 深さ約 15 km) が知られている。また、約 300 年ごとにどれかのセグメントが動いていて、セグメント間での連動もあつたらしい。近過去での地震断層は 17 世紀に起きているので、近々 M7 が起きる確率は高く、合衆国ではサンアンドレアス断層系などについて危険な地域とされている。

ワサッチ活断層系は必然的にソルトレイクバリーとユタバリーの西縁をなす。約 2 万年前の LGM の終了間際に、最大の氾濫を起こしたボネビルレイクは、約 1.9 ? 1.5 万年前には最高位段丘 (ボネビル面) を作り、その後次第に退いた。段丘を形成していた時の湖水面は、アイダホ州最南東縁の Red Rock と呼ばれるダム状の自然地形でかるうじて維持されていたが (北方ヘスネークリバー水系へ流下していた) その後乾燥期に入るとその地形を越えることが出来ず、次第に湖面を下げついに塩湖となった。その途中でもう一度約 1.4 万年前に湖水位安定期があり、中位段丘 (プロボ面) を作った。それ以降継続的に水位は下がりつつある (ユタ湖は現在までも淡水である)。これらの段丘や湖底面は、どこでも大なり小なりワサッチ活断層系で変位している。段丘堆積物とその基盤の古生層を切る断層面のスリッケンラインのレイクはほとんど 90 度すなわちディップスリップのみであり、一度期の最長変位は 2 m に達する。変位史の研究にもとづくと、中新世の 1900 万年以降伸張テクトニクスは連綿として継続しており、BRP での累積の歪は、約 25% に達するという。ただし、地形からも分かるように、最近数万年の活動は、ネバダ州西部とユタ州北部など限られた地域であるようだ。これらは、活断層、マイクロサイズミシティー、GPS などからも判断される。BRP の伸張テクトニクスのメカニズムについては、以下の 4 つの説がある。1. ララマイド変動で出来たプラトーの重力的な崩壊、2. ファラロン・太平洋拡大軸の沈み込みに伴うロールバック、3. ホットスポットによる weakening と doming、4. サンアンドレアス断層に沿う太平洋側のプレートの NW への変位に伴うプレート境界の再配列。コロラド高原の特に周辺では、第四紀火山活動は想像以上に著しいが、この活動と活断層の活動度は相反的であり、伸張歪が断層活動の前に、マグマの貫入によって解消されているかもしれない。マグマティズムの成因に関しても、島弧活動に主眼を置く考え方と、ホットスポットないしプレートに主眼を置く考え方の間には大きな開きがあり、今後とも十分な検討が必要である。

キーワード: ワサッチ活断層系, ユタ州, 伸張テクトニクス, 歪集中帯, コアコンプレックス, マグマの貫入

Keywords: Wasatch active fault system, Utah, stretching tectonics, strain concentration, core complex, magma intrusion

新しい岩脈法

Latest methods for inferring stress conditions from dikes and mineral veins

山路 敦^{1*}

YAMAJI, Atsushi^{1*}

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

¹Div. Earth Planet. Sci., Kyoto Univ.

岩脈群からその形成時における 3 軸の方向を推定する、いわゆる岩脈法が、1970 年代以降あちこちで使われている。1980 年代以降、岩脈たちの方向から 3 本の主応力軸の方向と応力比を推定する新しい岩脈法が開発されている。最近の手法では、平行岩脈群でなくとも、応力が推定できるようになった。すなわち、岩脈の極が等積投影図上で一点集中型のクラスターをなさず、ガードル状でも、また、一様分布に近い場合でも、応力状態を推定できる。今や、主応力軸と応力比を誤差付きで推定することができるのである。また、異なる応力状態でできた岩脈群が混在する場合でも、混在した岩脈たちの方向からそれらの応力状態を識別することができる。本公演では、その発展をレビューし、原理について説明する。最新の方法論は、本セッションで佐藤活志ほかで紹介する。また、天然のデータに適用した例を、山路・星がポスターで紹介する。

キーワード: テクトニック応力, マグマ圧, クラスター解析

Keywords: tectonic stress, magma pressure, clustering

地震時のローカル応力のベクトル変化の指標としての温泉湧出異常 Water level and temperature change of geothermal spring as a good indicator of a vectorial change of the local stress

川辺 孝幸^{1*}, 中野啓二²

KAWABE, Takayuki^{1*}, NAKANO Keiji²

¹ 山形大学地域教育文化学部, ²TeFS

¹Faculty of Education, Art and Science, Yamagata University, ²Terra-Fluid Systems

2011年3月11日14時46分に発生した平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震によって、山形県や福島県南部～茨城県北部における複数の温泉には、水位の低下や湧出量の低下が起こった。その一方で、福島県いわき市では、温泉が地表に湧出するようになった。地震直後に湧出量の低下した温泉の中では、その後の余震を経て徐々に湧出量・湯温が回復しつつあるものもある。このような地震にともなう温泉湧出量の変化は、1995年兵庫県南部地震の際や、2004年新潟県中越地震の際にも知られている。

温泉は、火山の熱水や第四系堆積盆地の深層地下水を除いて、基本的には岩盤中の裂か系に浸透して地温によって温められた地下水が地表に湧出したものであり、地震時における湧出量の変化は、地殻表層部の変形に伴う二次的応力の変化によって、温泉を貯留する裂か系の開口幅が変化変化するからである。湧出量は、開口する方向に働けば低下し、逆に閉じる方向に働けば、増えることになる。

2011年東北地方太平洋沖地震では、東北地方南部の地上部では5mを越す南東方向への伸張が起こっている(国土地理院, 2011)。

山形県、福島県南部から茨城県北部の湯量の低下した温泉のほとんどは、伸張方向に直交方向の島弧に平行な方向、もしくは伸張方向に対して引張成分が含まれる方向に斜交した方向の裂か系に伴う温泉である。これらの温泉では、地殻表層部の伸張に伴って、温泉貯留部となっている割れ目系が開口したために、割れ目を充填していた地下水の水位が低下したと考えられる。

茨城県北部から福島県南部の阿武隈山地南部地域では、本震以降、棚倉破砕帯の東側に沿う北西-南東方向とそれに直交する北東-南西方向に正断層メカニズムの地震群が多発しており、実際に正断層型の地表地震断層も発見されており、これらの地震群に囲まれた範囲の地殻上部が、ブロックとしてあたかも地すべりのような運動をしているように見える。このような運動は、棚倉破砕帯の東側に沿う温泉群での湧出量低下と、ブロックの運動方向側にあるいわき市内で地表への温泉湧出と調和的である。以上のように、地震時における温泉の湧出量変化は、その温泉を賦存する裂か系に対する応力のベクトル変化を敏感に反映しているといえる。

キーワード: 温泉湧出異常, 裂か系, ローカル応力, ベクトル変化

Keywords: Water level and temperature change of geothermal spring, vectorial change of local stress field

東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測施設整備で得られた四国・紀伊半島周辺の浅部地殻応力に関する情報 Crustal stress around Shikoku and Kii region derived from the construction of integrated groundwater observation network

佐藤 隆司^{1*}, 北川 有一¹, 重松 紀生¹, 高橋 誠¹, 塚本 齊¹, 木口 努¹, 板場 智史¹, 梅田 康弘¹, 佐藤 努¹, 関 陽児¹, 小泉 尚嗣¹
SATO, Takashi^{1*}, KITAGAWA, Yuichi¹, SHIGEMATSU, Norio¹, TAKAHASHI, Makoto¹, TSUKAMOTO, Hitoshi¹, KIGUCHI, Tsutomu¹, ITABA, Satoshi¹, UMEDA, Yasuhiro¹, SATO, Tsutomu¹, Yoji Seki¹, KOIZUMI, Naoji¹

¹ 産業技術総合研究所

¹GSJ/AIST

産業技術総合研究所では、2006年度から、東南海・南海地震の発生予測精度向上のため、南海トラフ沿いの愛知県、紀伊半島および四国地域において地下水等総合観測施設の整備を行っている。各観測施設には深さの異なる3つの観測井(標準的深さ600m, 200mおよび30m)が掘削され、水位計、歪計、地震計等が設置された。これまでに14観測施設が完成し、観測を続けている。観測井掘削中には、いくつかの観測点において水圧破砕法や応力解放法などによる地殻応力測定が実施された。また、多くの点でボアホール・テレビアホール・カメラによる孔壁の観察から、ボアホール・ブレイクアウトや掘削に伴う水圧破砕などの地殻応力方位に関する情報が得られた。採取されたコアにディスクキングが認められた観測点もある。また、DSCA法などコアを用いた地殻応力測定も試みられた。ここでは水圧破砕法による応力測定結果、および孔壁観察によるボアホール・ブレイクアウトや掘削に伴う水圧破砕の出現方位分布をとりまとめたので報告する。

水圧破砕法による地殻応力測定は花崗岩質の岩石が採取された愛知県豊田市、三重県津市、紀北町、熊野市および高知県土佐清水市の5ヶ所で行われた。亀裂再開口圧を精度よく推定するため、流量および水圧は測定区間直上に設置されたセンサによって計測された。600m孔の孔底付近までの複数深度で応力値を推定することのできた豊田市の観測点では、最大水平圧縮応力の方向が東-西から北東-南西の逆断層タイプの応力場が得られた。

孔壁の観察からは14観測点のうち11観測点でボアホール・ブレイクアウトまたは掘削に伴う水圧破砕が認められた。これらの出現方位分布および水圧破砕法地殻応力測定の結果からは最大水平圧縮応力が東-西ないし北東-南西方向を向くものが卓越する。この方向はアムールプレートに対するフィリピン海プレートの相対運動方向に対して直交または大きく斜交する。地殻内の浅い地震のメカニズムやこれまでの応力測定の結果とはおおむね調和的である。現在、得られた応力の方向と孔壁に記録された亀裂の方向との関連について調べている。

キーワード: 四国・紀伊半島, 浅部地殻応力

Keywords: Shikoku and Kii region, Shallow crustal stress

孔井内歪計の長期トレンドを用いた応力方位の推定 - 紀伊半島・四国での例 - Estimation of crustal stress orientations from long-term trends of borehole strainmeters around Kii and Shikoku regions

木口 努^{1*}, 桑原 保人¹, 松本 則夫¹, 小泉 尚嗣¹

KIGUCHI, Tsutomu^{1*}, KUWAHARA, Yasuto¹, MATSUMOTO, Norio¹, KOIZUMI, Naoji¹

¹ 産総研

¹GSJ, AIST

孔井内歪計の観測データのうち、長期トレンドの主要部分は、岩盤に孔井を掘削することによる応力擾乱の緩和過程を反映したものである可能性がある。このモデルによれば、水平歪各成分の長期トレンドの差は異方的な応力場により生じ、孔井は最大水平圧縮方向に最も縮むことになる。産総研では、2006年より紀伊半島から四国周辺において東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測施設の構築を進め、2010年までに14地点を整備した。各観測施設では深度600mまたは200mの孔井の孔底にボアホール型歪計が設置されている。本研究では、これらの実際の長期トレンドデータが応力擾乱の緩和過程をみているものとして矛盾は無いのか検討し、またこのようなモデルで解釈した場合の各地点の最大水平圧縮応力の方位の推定を試みた。

解析では、まず Matsumoto et al. (2011) の方法によって理論潮汐と比較した歪計のキャリブレーションが行われた13地点について、歪計の設置から2011年9月末までの約700-1600日分の歪データ(日値)を使用した。また、異方的な応力場に注目するため、4成分の歪値から平均歪を引いた値を用いた。次に、90日間の各成分の歪データから4方向の孔径変化を求める。本モデルによる孔径変化の方位依存性は \cos^2 (: 最大水平応力方位と歪センサーのなす角度) に比例するので、孔径変化に \cos^2 の関数の曲線を近似すると、その短軸方向が最大圧縮方向となる。さらに、90日の期間を1日ずつ移動させることにより、観測期間中の短軸方向が順次、連続的に求められる。13地点のうち9地点では、それぞれ、解析期間中に得られた方位の標準偏差が2度以内であり、ほぼ一定した応力方位が求められた。しかし、残りの地点では解析期間にデータのトレンドが変化することなどにより応力方位は大きく変動し、安定した方位を決定することが困難であった。安定した方位が得られた9地点の応力方位は北東-東-南東の範囲に分布し、ばらつきは大きい。今後、各地点における孔壁のブレイクアウトの観察、水圧破碎試験やコア試験などから得られる応力の結果と比較するとともに、長期トレンドデータに粘弾性や多孔質媒質のモデルを適用し、本手法の有効性の検討を行い、また紀伊半島から四国周辺の応力場の解明を進めたい。

キーワード: 地殻応力方位, 歪計, 長期トレンド, 紀伊半島, 四国

Keywords: crustal stress orientation, borehole strainmeter, long-term trend, Kii Peninsula, Shikoku Island

坑井物理検層データを用いた応力場の不均一性解析 Analysis Stress Field Heterogeneity by Using Logging Data

柴沼 潤^{1*}, 山田 泰広², 松岡 俊文²

SHIBANUMA, Jun^{1*}, YAMADA, Yasuhiro², Toshifumi Matsuoka²

¹ 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻, ² 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

¹Graduate School of Engineering, Kyoto University, ²Department of Urban Management Engineering, Kyoto University

1. 研究の背景と目的

地下応力場の計測は、断層形成やそれに伴う地震発生メカニズムの解明、坑井掘削の安定性の向上などを目的として実施されている。応力場は主としてその地域のテクトニクスに支配されると考えられていることから、離散的に計測された応力値がその周辺地域を代表する値として扱われている。しかしながら地下構造は決して均質ではなく、特に断層や不整合といった不連続面構造の近辺では応力が複雑化していると考えられる。

本研究では南海トラフにおいて取得された物理検層データを用いて、地下応力場の不均一性を解明することを目的とする。この地域には、分岐断層と呼ばれる巨大地震断層や、中・小規模の多数の断層が存在する付加体と呼ばれる地質体が分布する。これらを貫通した坑井で取得した検層データを用い、断層の存在による応力の方位とマグニチュードの変動を集中的に解析する。

2. 解析手法

今回は孔壁崩壊 (borehole breakout) を用いた応力計測法を採用した。この崩壊は掘削後の応力集中により引き起こされ、その発達方位は最小主応力 (Shmin) 方向に一致する (図 1)。また孔壁の崩壊には破壊基準が関与し、その崩壊端では応力値と強度が釣り合っていると考えられる。孔壁の強度は計測された P 波速度データと、経験的に得られた P 波速度と岩石強度の関係式から導き出せる。崩壊端における応力値は水平主応力と崩壊幅 (WBO) の関数であるため、破壊基準から孔壁にかかる主応力のマグニチュードを算出できる。ただし主応力値は一意的には決まらず、存在する領域を特定するに留まる。今回は孔壁画像データを用いてこの崩壊痕の分布を観察し、応力の方位とマグニチュードを解析した。

3. 結果と考察

付加体内では主応力方向の回転する領域がいくつか観察された。巨大分岐断層 (265~290mbsf) 近辺では Shmin の方位は N36 °E から N68 °E まで回転している (図 2)。マグニチュードに関しては、鉛直応力に対する水平主応力の比率が増加する傾向が見られた (図 3)。分岐断層は走向 NE50°65 °、傾斜 18°21 °の逆断層であるが、分岐断層近辺の最大主応力方向は断層面に垂直になるように変化し、主応力値の比率はより逆断層型に近づくことがわかった。また 170~180mbsf に確認されている中規模逆断層では方位に変動は見られなかったが、応力値の増減は見られた。その他の深度においても方位、マグニチュード共に変動が見られる。これらは小規模な断層の存在によるものと考えられる。

4. 今後の展開

本研究では応力マグニチュードを三軸主応力のうちの一つが鉛直応力に一致すると仮定した上で算出した。断層近辺では主応力方向が回転している可能性があるため、この効果を考慮して坑井周辺の応力マグニチュードをより正確に計算する予定である。

キーワード: 地下応力場, 物理検層, 南海トラフ, 掘削同時検層, 孔壁崩壊

Keywords: Stress, logging, Nankai Trough, LWD, borehole breakout

地震のメカニズム解を用いた本州弧と琉球弧の接合部における応力場の決定 Transitional patterns of crustal stress field between Honshu arc and Ryukyu arc in Japan

大坪 誠^{1*}, 久保 篤規²

OTSUBO, Makoto^{1*}, KUBO, Atsuki²

¹ 産業技術総合研究所 地質情報研究部門, ² 高知大学

¹Geological Survey of Japan/AIST, ²Kochi University

Deformation and stress state in active island arcs are important for understanding the dynamics. We analyzed crust stress state in the connective region between Honshu and Ryukyu arc to understand the transitional stress between with and without backarc opening of the arcs around southwestern Japan arc. In this study, we apply the multiple inverse method (Otsubo et al., 2008) into the focal mechanism solutions (best double couple components of regional moment tensors derived by F-net, NIED, Japan) in the area. The data were obtained from about ~400 shallow earthquakes (< 20 km) since January 1st, 1997 to December 31st, 2010. All local magnitudes were greater than 3.0. As a result, the multiple inverse method shows different stress province from one found by P-/T- axes. In perspective view, Shmax and Shmin directions rotate gradually from Honshu to Ryukyu. This result constrains patterns of the fan shaped stress trajectory between compressive Honshu arc and extensional Ryukyu arc, which is important issue to the understand geodynamics of subduction zone island arc. In addition, the multiple stress solutions and these stress ratio variations indicate locally heterogeneous stress states between Honshu arc and Ryukyu arc.

Acknowledgements:

Thanks are also due to the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) for making available the focal mechanism data in the study area.

Reference:

Otsubo, M., Yamaji, A. and Kubo, A. (2008) Determination of stresses from heterogeneous focal mechanism data: An adaptation of the multiple inverse method. *Tectonophysics*, 457, 150-160.

キーワード: 発震機構, 応力, 沈み込み, 応力テンソルインバージョン, 地震, 九州

Keywords: Focal mechanism, Stress, Subduction, Stress tensor inversion, Earthquake, Kyushu

岩脈群や鉱物脈群による応力推定法に用いる確率分布型の検討

Parametric and non-parametric methods of determining paleostress from dykes or veins

佐藤 活志^{1*}, 山路 敦¹, 藤内 智士²SATO, Katsushi^{1*}, YAMAJI, Atsushi¹, TONAI, Satoshi²¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 産業技術総合研究所¹Div. Earth Planet. Sci., Kyoto Univ., ²AIST

岩脈群や鉱物脈群の方位は、過去のテクトニック応力の指標となる。無傷の岩体中に新規に形成される開口割れ目は、最小圧縮主応力 (σ_3) 軸に直交すると考えられる。一方、実際の岩体には既存の弱面があることを考慮し、Jolly and Sanderson (1997) は流体圧に応じて一定の範囲の方位を持つ割れ目群ができるというモデルを提示した。このモデルは、実際の岩脈群や鉱物脈群の方位がばらつくことをよく説明し、3つの主応力軸方位と応力比 $\sigma_2/\sigma_3 = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ を決定する逆解析法の発明をもたらした (例えば、Andre et al., 2001)。ただし従来の手法では、割れ目群の方位分布範囲の境界を認定する必要があるが、実際には分布範囲の周縁に向かって割れ目の頻度は漸減することが多く、認定は困難であった。この問題を解決するために、境界の認定をせず、最尤法によって確率分布モデルを割れ目群の方位分布に当てはめることで応力を推定する手法が提案された (Yamaji et al., 2010)。この手法の基本的な仮定は、面にはたらく法線応力が大きい方位ほど割れる確率が低いという、法線応力に対する割れ目頻度の単調減少性である。

Yamaji et al. (2010) は Bingham 分布 (球面上の指数型分布) を割れ目群の方位頻度分布に当てはめた (以下、Bingham 法と呼ぶ) が、別の関数形が適する可能性もある。そこで本研究は、2つの新しい手法を提案する。1つは自由度の高い冪乗型の確率分布モデルを用いる方法 (冪乗法と呼ぶ)、もう1つは確率分布自体を用いないノンパラメトリック手法 (ノンパラメトリック法と呼ぶ) である。冪乗法の利点は、様々な形の単調減少関数を表現できる柔軟性にある。また、流体圧 P_f の相対値 $\sigma_2/\sigma_3 = (P_f - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ をパラメタに持つので、逆解析によってこの値を客観的に決定することも利点である。一方、ノンパラメトリック法では単調減少性の指標として法線応力と割れ目頻度の順位相関係数を用い、これを最小化 (負の相関を最大化) した。この方法ならば、あらゆる形の単調減少関数を同等に評価できる。また、確率分布型を仮定せずに解析を行えることも利点である。

模擬データの解析により、新手法の性能を調べた。まず、Bingham 型の確率分布に従う割れ目群の模擬データを解析したところ、Bingham 法、冪乗法、ノンパラメトリック法のいずれでも誤差の範囲内で正解の応力が検出された。ただし、精度と確度においては Bingham 法と冪乗法が同等であり、ノンパラメトリック法はそれらに劣った。次に、ステップ関数型の模擬データを解析した。3つの手法のすべてで正解の応力が得られたが、冪乗法の精度と確度が高く、Bingham 法とノンパラメトリック法は特に応力比の確度が低かった。この模擬データでは、割れ目の頻度が急減する法線応力が流体圧に対応する。冪乗法によって、流体圧の相対値が精度よく決定された。以上の検証により、Bingham 法に比べて冪乗法は汎用性が高く、流体圧の推定においても有利であることが分かった。また、ノンパラメトリック法も実用に耐える精度と確度を持つ。方位頻度分布に関する根拠に乏しい仮定を排除できるという点で、ノンパラメトリック法も実用に値すると言える。

天然のデータへの適用例として、約 19Ma (Hoshi and Takagawa, 2009) に美濃-丹波帯に貫入した安山岩質岩脈群 (福井県敦賀市周辺) の解析結果を紹介する。測定した約 100 枚の岩脈面方位データに前述の3つの手法を適用したところ、共通して NW-SE 方向の σ_3 軸をもつ正断層型の古応力状態が得られた。Bingham 法とノンパラメトリック法の精度は同等で、冪乗法の精度が最も高かった。冪指数は 1 に近い直線型の頻度分布であり、応力比 $\sigma_2/\sigma_3 = 0.66 \pm 0.19 / -0.22$ 、流体圧の相対値 $\sigma_2/\sigma_3 = 0.76 \pm 0.06 / -0.16$ が得られた。日本海拡大時期のテクトニック応力が正断層型であったこと、応力比が中程度 (三軸応力) であったことが新知見である。

References

- Andre, A.S., Sausse, J. and Lespinasse, M., 2001, *Tectonophysics*, 336, 215-231.
 Hoshi, H. and Takagawa, M., 2009, *Jour. Geol. Soc. Japan*, 115, 96-99.
 Jolly, R.J.H. and Sanderson, D.J., 1997, *Jour. Struct. Geol.*, 19, 887-892.
 Yamaji, A., Sato, K. and Tonai, S., 2010, *Jour. Struct. Geol.*, 32, 1137-1146.

キーワード: 応力逆解析, 岩脈, 鉱物脈, 流体圧, ノンパラメトリック手法

Keywords: stress tensor inversion, dyke, vein, fluid pressure, non-parametric statistics

中部地方南部の領家花崗岩中のマイクロクラックを用いた古応力場の復元 Paleostress analysis using healed microcracks in the Ryoke granites, southern Chubu District.

金井 拓人^{1*}, 会沢 辰介², 高木 秀雄¹
KANAI, Takuto^{1*}, AIZAWA, Shinsuke², TAKAGI, Hideo¹

¹ 早稲田大学大学院創造理工研究科, ² 日鉄鉱業株式会社

¹Waseda University, ²Nittetsu Mining

岩石中の微小割れ目はマイクロクラックと呼ばれ、特にクラック中に流体が取り込まれることで断面が癒合したものはヒールドマイクロクラック (以下 HC) と呼ばれる。HC は顕微鏡下で流体含有物の配列として認識され、流体含有物のマイクロサーモメトリーから、その形成年代に制約を与えることができる。例えば土岐花崗岩では約 300 ~ 400 °C の捕獲温度が推定されており (高木ほか, 2008), この温度条件は K-Ar 系における黒雲母の閉鎖温度に近いことから、HC の形成年代は黒雲母の K-Ar 年代により制約を与えることができる。また、HC が引張割れ目であるという特徴から、領家花崗岩中の HC の方位分布を用いた古応力場の復元を試みた多くの研究がなされてきた。その中で、新城トータル岩および三都橋花崗岩 (会沢・高木, 2008), 土岐花崗岩 (高木ほか, 2008) において復元された最小応力 σ_3 軸方位は、新城地域で MTL の走向にほぼ直交する方位を示し、土岐地域では MTL の走向にほぼ平行な方位を示すという結果が求められている。そこで、両者の間の変化をみることを目的として、両花崗岩体の間に分布する武節花崗岩、伊奈川花崗岩および小原花崗岩を対象とした。

ユニバーサルステージを用いて水平面、東西鉛直面、南北鉛直面の直交三面の薄片中の石英粒内に発達する HC の走向傾斜を測定し、コンターダイアグラムを作成した。その結果、ほとんどの HC の方位分布は直交 2 方向および直交 3 方向に集中するという特徴を示した。HC 方位の直交分布についてはクラックの発生による歪解放に伴う主応力軸の転置が生じたものと考えられる。そこで本研究では HC 方位分布をもとに、直交関係を示す複数のクラスターに分離するクラスター解析を行った。コンターダイアグラムの見かけ上直交方向に卓越するクラスターのなす角は 90 ° ~ 70 ° に集中することから、クラスターの中心のなす角が 70 ° 以上であるものを直交関係にあるとした。本研究において求めた HC 方位分布に加え、新城トータル岩および三都橋花崗岩 (会沢・高木, 2008), 土岐花崗岩 (高木ほか, 2008) で求められた HC 方位分布を用いてクラスター解析を行い、最もクラック数の多いクラスターの中心が表す面に対して直交する方位を σ_3 軸方位として求めた。

新城地域から土岐地域へかけて測定した HC の姿勢から推定される σ_3 軸方位は、MTL に近い地域ほど MTL の走向に直交する方向を示す。MTL の走向と σ_3 軸方位のなす角を MTL からの距離別でみると、MTL から離れるにつれて MTL の走向と σ_3 軸方位のなす角は小さくなり、 σ_3 軸方位は MTL の走向に平行に近い方位を示す。

以上から、MTL から離れた土岐およびその周辺地域では σ_3 軸方位に直交する最大水平圧縮応力軸 σ_3 -Hmax 方位が MTL の走向に直交する方位を示し、その方位は白亜紀後期 ~ 古第三紀前期のプレート運動から復元される圧縮応力場に調和的であるが、MTL から近い地域では、 σ_3 軸方位が MTL から直交するという結果が得られた。この結果は、MTL から近い地域の古応力場が MTL の活動や三波川帯の上昇 (高木ほか, 2008) によって変化した可能性が考えられ、その原因についてさらに検討を加えたい。

文献

会沢辰介・高木秀雄, 2008, 領家花崗岩中のヒールドマイクロクラックを用いた古応力場の復元と中央構造線の折れ曲がり. 日本地質学会学術大会講演要旨, 115, 221.

高木秀雄・三輪成徳・横溝佳侑・西嶋圭・円城寺守・水野崇・天野健治, 2008, 土岐花崗岩中の石英に発達するマイクロクラックの三次元方位分布による古応力場の復元と生成環境. 地質雑, 114, 321-335.

キーワード: ヒールドマイクロクラック, 古応力場解析, 中央構造線, 領家花崗岩

Keywords: Healed microcrack, Paleostress analysis, Median Tectonic Line, Ryoke granite

実験及びシミュレーションによる削剝を考慮した圧縮スラスト帯モデリング Modeling of fold-and-thrust belt by analogue experiment and simulation considering erosion

中務 真志^{1*}, 山田泰広¹

NAKATSUKASA, Masashi^{1*}, YAMADA Yasuhiro¹

¹ 京都大学大学院工学研究科

¹ Kyoto University Graduate School of Engineering

圧縮応力場では fold-and-thrust 帯が生じ、逆断層によって隆起する。削剝作用が活発な地域では隆起域が侵食されて上載荷重圧が減少する。これによる応力場変動が地質構造変形に影響を及ぼす可能性があるが、その影響はよく分かっていない。そこで、本研究ではアナログモデル実験によって削剝を考慮した構造変形過程をモデリングし、さらにその実験を二次元個別要素法によってシミュレートすることで地下における応力分布の経時変化を抽出し、削剝状況下における構造発達メカニズムを考察した。

アナログモデル実験とは、模擬物質によってモデルを作成しそれを変形させることで実際の現象を縮小再現する手法である。今回は模擬物質として乾燥した豊浦標準砂を用いた。透明な箱内に約 3° 傾斜した基盤を設置し可動式のシートを被せ、その上に乾燥砂を堆積させた。このシートを動かし側壁に砂を押し付けることによってモデルを圧縮変形させる。本研究では削剝ありの実験と削剝なしの異なる二つの実験を行った。なお、削剝を考慮する際には逆断層による隆起域を断続的に除去した。二つの実験の結果、削剝なしの実験では逆断層による活構造が前方に伝播したが、一方で削剝なしの実験では活構造が前方へ伝播せず一定領域内で逆断層の形成、停止が繰返されることを確認した。

二次元個別要素法とは、円形粒子の集合体によって連続体のモデルを構成し、個々の粒子の運動を追うことでモデルの挙動を表現する手法である。粒子の運動を計算するために各タイムステップで運動方程式を解き、粒子の加速度、速度、位置情報を更新していく。運動方程式を解く際に必要な力は粒子間の接触力を用いる。この接触力は粘弾性物体のレオロジーをよく表現する Voigt モデルによって求めた。また、モデル上に半径 250 m の測定円を層厚方向 20 個 × 横方向 60 個の計 1200 個分規則的に配置し、圧縮変形時におけるモデル内の応力とひずみを測定した。

シミュレーションの結果、圧縮による応力集中が生じた後、その領域で断層が発生しそれによって応力が解放されることを確認した。断層の活動度が高いときは応力の集中度は小さいが、断層の活動度が低下するとその断層の前縁部に応力が集中し始め、その領域で新たな断層が生じる。以上のプロセスが繰返すことによって、逆断層は比較的近接する領域で形成し続けた。この結果から、削剝が卓越する地域においては応力集中は前方にはあまり伝播しないと考えられる。

本研究は経済産業省委託事業「地質環境総合評価技術高度化開発」の成果の一部である。

キーワード: 地質構造変形, 断層, 褶曲帯, 砂箱実験, 個別要素法, 削剝, 応力変化

Keywords: structural deformation, fold-and-thrust belt, sandbox experiment, distinct element method, erosion, stress change