

令和元年6月6日現在

機関番号：11301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2014～2018

課題番号：26109002

研究課題名(和文)内陸地殻の強度と応力の解明

研究課題名(英文)Clarification of strength and stress of the inland crust

研究代表者

松澤 暢(Matsuzawa, Toru)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：20190449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 225,800,000円

研究成果の概要(和文)：高精度の震源分布と発震機構解を求めることにより日本列島の地震発生域の差応力の推定を行った。少なくとも一部の活断層では非常に強度が小さいと仮定しなければ断層は滑れないことがわかった。P波初動データから応力場を高精度で推定する手法を開発し、その有効性を検証した。地形と発震機構解との相関や大地震後の応力場の回転から地震発生域の差応力を見積もったところ、調査した領域では最大でも100 MPaには満たないと推定され、これは静水圧を仮定した時の摩擦係数が0.1-0.3程度以下と極めて小さいことに相当する。このような強度低下の原因としては、少なくとも群発地震については流体が関与しているという証拠を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、地震時の応力降下量が無視できない程度には地震発生域の差応力が小さいことが明らかになった。このことは、地震が発生した直後に同じ場所で地震が起きる可能性は極めて小さく、また地震の発生は応力集中よりも強度低下のほうが主たる原因であることを意味している。したがって、地震発生にはある程度の周期性が生じるとともに、強度低下を起こしやすい場所で地震が起こりやすいことになる。つまり、地震発生の確率は時間的にも空間的にも一様ではないことになり、本研究成果は地震発生モデルの構築において重要であるだけでなく、時間空間的に、どこで地震防災対策を強化すべきかを検討する上でも極めて重要である。

研究成果の概要(英文)：We estimated the differential stress in the seismic zones beneath the Japanese Islands from the precise hypocenter locations and focal mechanism solutions in this study. We found that some active faults cannot slip unless the strength is very small there. We have developed a method to estimate accurate stress fields using P wave initial motion data and verified its effectiveness. Based on the correlation between the topography and the focal mechanism solutions and the stress rotations around the source areas after large earthquakes, we found that the differential stress in the seismic zone is less than 100 MPa, which corresponds to an extremely small frictional coefficient of about 0.1-0.3 assuming hydrostatic pore pressure. We also obtained some evidences showing that such low strength is caused by high pore pressure for earthquake swarms at least.

研究分野：地震学

キーワード：地殻応力 地殻強度 応力テンソルインバージョン 地殻流体

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

地殻内の強度と応力の情報は地震発生過程を理解する上で必要不可欠である。地震が主に発生する深さ 10km 付近では、かぶり圧は 300MPa 程度となり、これが断層面にかかる法線応力に等しいと仮定し、通常の摩擦係数 0.6 を考えれば、最大静止摩擦力は 180MPa 程度、差応力で 360MPa 程度となる。しかし、近年、様々なデータから、地震発生域における差応力はこのような概算から推定される応力の 1/10 以下であるとする報告もなされるようになってきた。これらの報告では、発震機構解データから応力テンソルインバージョンを行い、求めた応力場が大地震前後で回転しているという解析結果から導かれたものである。しかしながら、もともとの応力場が極めて不均質であった場合、このような手法によって得られる剪断応力は過小評価されているとの指摘もあり、未だ論争が続いている。この断層が弱いのか否かの問題の解決は内陸地震を理解するために避けては通れない大問題であるため、本計画研究ではこの問題に真正面から取り組むことにした。

2. 研究の目的

異なる地震環境にある複数の地域で、稠密な地震観測を行うことにより、推定精度の高い発震機構解の分布を求め、大地震に伴う応力変化との関係を定量的に考察することにより、差応力の絶対値を推定する。観測フィールドとしては、M9.0 の 2011 年東北地方太平洋沖地震（以下、「東北沖地震」と呼ぶ）の前と後で卓越する発震機構解が大きく変化した秋田県北部～中部、M7.2 の逆断層地震である 2008 年岩手-宮城内陸地震が発生した東北地方脊梁部、M7.3 の横ずれ断層型地震が 2000 年に発生した鳥取県西部、東北沖地震のあとに M7.0 の正断層型地震をはじめ地震活動が活発化した福島県南東部～茨城県北部とする。

3. 研究の方法

東北沖地震後に発震機構解の回転が検出された秋田県北部～中部と M7.3 の横ずれ断層型地震が 2000 年に発生した鳥取県西部で臨時地震観測網を展開する。また、2011 年に M7.0 の正断層型地震が発生した福島県南東部～茨城県北部および M7.2 の逆断層型地震である 2008 年岩手宮城内陸地震が発生した東北地方脊梁部での臨時地震観測を継続する。発震機構解の解析を現有のデータで進めるとともに、誤差分布を考慮した発震機構解の推定法の開発や、応力テンソルインバージョン手法の改良も行う。これらによって得られる大地震前後の発震機構解の変化と、高精度の震源分布から、差応力の空間分布を推定する。さらに、得られた結論が地震活動の時空間変化と整合的かどうかを検証する。この結果を解釈するために、B01（構造班）と B03（流体班）によって推定された地震発生域の構造と B02（変形実験班）による流体存在下での断層の挙動および A02（変形班）による歪速度分布を考慮し、C01（モデル班）によって作成されるモデルとの比較も踏まえて、そのような応力分布が得られた理由を考察する。

4. 研究成果

(1) 地形との相関と大地震後の応力場の回転に基づく差応力の推定

東北地方の内陸の広域の応力テンソルインバージョンを行い、最大圧縮力軸方向が背弧側と前弧側で異なること、また、低地では逆断層型が卓越しているものの、標高の高い地域は横ずれ断層型で特徴づけられることを明らかにした。さらにベンディングと地形の影響を考慮したシミュレーションにより、差応力が 15-25MPa 程度となっている可能性を指摘した (Yoshida et al., 2015a)。また、大地震後の応力場の回転に基づき東北地方の差応力が数十 MPa 程度しかないことを示した (Yoshida et al., 2014, 2015b, 2016b)。

(2) 現在の応力場と活断層の関係

日本列島全域において応力テンソルインバージョンを行い、得られた応力の主軸方向と主要活断層とを比較した。その結果、ほとんどの活断層は現在の応力場の方向から見て滑りやすい状態になっているものの、一部については、野島断層や花折断層のように現在の応力場から見て滑りにくい状態になっている活断層もあることが明らかになった (Yukutake et al., 2015)。これらを滑らすためには間隙圧上昇等の強度低下のメカニズムが必要である。

(3) 応力場推定の新たな手法の開発

P 波初動から応力場の空間パターンを直接求める統計的手法を新たに開発し、図 1a に示す 2000 年鳥取県西部地震の余震域で得られたデータを解析した (Iwata, 2018)。

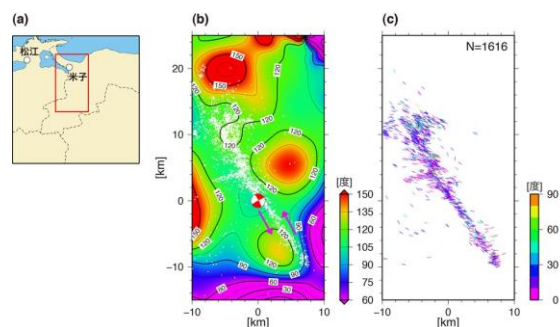


図 1. (a) 本研究で新しく開発した手法を適用した 2000 年鳥取県西部地震の余震域（図中の赤枠内）。(b) 得られた 2000 年鳥取県西部地震の余震域における応力場の空間パターン。最大主応力軸の方位角（北から時計回り）を色で示す。ビーチボールは本震の震央とメカニズム解、白点は P 波初動データを得た余震の震央分布をそれぞれ表す。(c) 推定した応力場と P 波初動データから求めた余震のメカニズム解の P 軸の向き（線の向きが方位角、色が水平面からの傾きに対応）。

その結果、本震断層の南端部で断層の西側と東側で応力場の回転方向が異なることを見出した (図 1b)。推定誤差を考慮に入れても回転方向の差異は有意である。さらに、この推定した応力場と P 波初動データから、余震のメカニズム解を推定しなおした (図 1c)。上で触れた断層南端部の応力場回転に呼応して、P 軸の向きがやはり回転していることが見て取れる。

(4) 2011 年東北地方太平洋沖地震後の内陸地震活動の活発化

2011 年東北地方太平洋沖地震の後に、東北日本の内陸で見られた地震活動の活発化は、この地震の発生前の東北日本の応力場の方向の空間変化と関係していることが明らかになった (Yoshida et al., 2018)。すなわち、もともと広域的な東西圧縮の応力場とは異なる領域において、本震の影響で局所的にせん断応力が増加したことにより断層滑りが生じやすくなり、地震活動が活発化したと考えれば、秋田県南部 (図 2) や福島県南西部～茨城県北部等での東北沖地震後の地震活動の活発化は説明できる。

一方、もともと東西圧縮の応力場で、本震発生後にせん断応力が低下したにも拘わらず、地震活動が群発的に活発化した領域も存在し、そのほとんどで同様の地震活動の拡大・移動が起こっていることを明らかにした (Okada et al., 2015)。これらの領域では、群発地震の震源が複数枚の面状に分布しており、時間とともに、深部から浅部に移動する様子が見られた (図 3)。しかも、地震活動や震源過程を特徴づける複数のパラメータが、いずれも同期して変化していることがわかった。このことはこれらの群発地震が、地殻内の流体の上昇により引き起こされていることを示している (Yoshida et al., 2016a, 2017; Yoshida and Hasegawa, 2018)。

(5) 2000 年鳥取県西部地震震源域の応力場

2000 年鳥取県西部地震震源域において稠密観測データから余震震源及びメカニズム解を高精度に決定し、本震断層モデルを推定した (図 4a)。余震は本震断層から約 1km の幅で分布しメカニズム解が多様であること (図 4b)、多くの余震は正の Δ CFP (断層の滑りやすさの指標) を持つことが分かった (図 4cd)。余震の主な発生要因として本震の滑りにより生じた静的応力変化により断層周辺に存在する微小断層で破壊が誘発されたと考えられる。ただし、大滑り領域では負の Δ CFP を持つ余震が多く発生し (図 4d)、その原因については今後さらに検証する必要がある (Yukutake and Iio, 2017)。

さらに、余震域の応力場の空間不均質をメカニズム解の Misfit 角に基づいて検証した。Misfit 角は単一なりファレンス応力を仮定したときの理論的な滑り方向と実際の滑り角とのなす角で定義される。Misfit 角分布はメカニズム解の誤差のみでは説明できずに応力場は空間的に不均質であることが明確になった。またその応力擾乱源として静的応力変化を考えると、摩擦係数 0.1 程度に相当する差応力レベルで分布が説明できることが分かった。

(6) 2016 年鳥取県中部地震震源域の応力場

2000 年鳥取県西部地震の合同余震観測データの解析により、余震域南端付近において、断層の両側で最大主応力の向きが異なっていることが見出され、地震すべりによる応力変化のパターンと良く似ていることから、断層南端付近で差応力が小さいことが指摘されていた。本研究

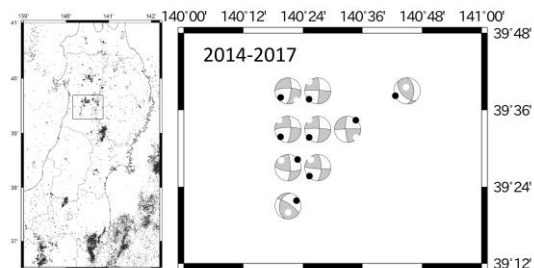


図 2. 東北沖地震後に秋田県南部で活発化した地震群から推定された応力場。黒丸が最大圧縮方向を示しており、この領域では広域応力場と異なり、北東-南西の圧縮場が卓越していることがわかる。

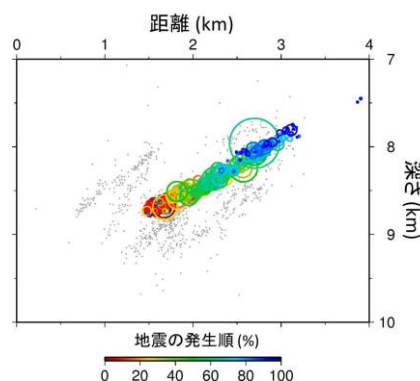


図 3. 東北沖地震後に山形-福島県境周辺で活発化した群発地震活動に見られる震源の移動。震源位置を北西-南東方向の断面図に投影して示す。

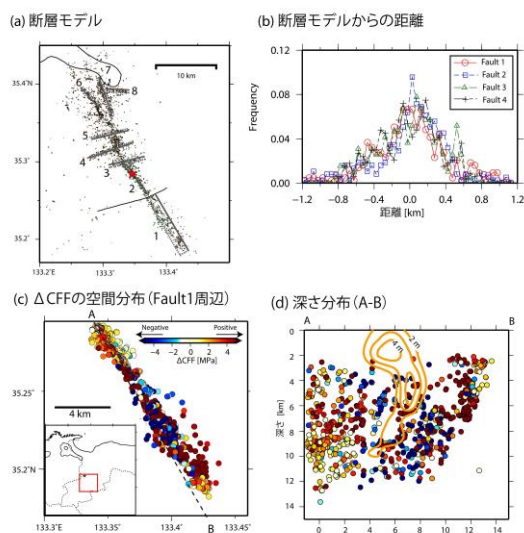


図 4. 2000 年鳥取県西部地震の余震の分布。

またその応力擾乱源として静的応力変化を考えると、摩擦係数 0.1 程度に相当する差応力レベルで分布が説明できることが分かった。

では、同じく山陰地方の地震帯で発生した 2016 年鳥取県中部の地震の余震観測データを解析して、差応力の大きさとその深さ変化を推定した。余震観測データは京大防災研、九州大学、東大地震研の合同余震観測班によるものである。

約 1 万個の精度良い地震メカニズム解の解析から、断層の両端付近の広い範囲において地震すべりによる変化と調和的な応力場のパターンが見られ、地震前には応力場は一樣と仮定すると、断層の南端付近深さ 4km で約 40MPa の差応力が見積もられた。また、深さ 3-6km では、深さとともに差応力が増加することが推定された。一方、それ以深では、余震分布の下限に向かって地震すべりが小さくなるにもかかわらず、同様な応力場のパターン見られることから、差応力は深さとともに増加しない可能性が指摘された。3-6km の深さにおいて、静水圧を仮定して摩擦係数を見積もると 0.3 程度の値となった。鳥取県西部地域においても小さな摩擦係数が得られており、地殻構造が比較的均質と考えられる山陰の地震帯において、地震発生域の差応力が従来言われているよりもずっと小さいことが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 68 件)

- ① 岩田貴樹、吉田圭佑、深畑幸俊、地震学的データを用いた応力インバージョン、地学雑誌、査読有、印刷中、2019
- ② 岩森光、行竹洋平、飯尾能久、中村仁美、地殻流体の起源・分布と変動現象、地学雑誌、査読有、印刷中、2019
- ③ 吉田圭佑、松澤暢、近年の地震観測により得られた東北日本の応力場の不均質性と断層強度および地震発生機構の関係、地学雑誌、査読有、印刷中、2019
- ④ Iwata, T., A Bayesian approach to estimating a spatial stress pattern from P-wave first-motions, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 査読有, Vol. 123, No. 6, 2018, pp. 4841-4858, DOI:10.1002/2017JB015359
- ⑤ Maeda, S., T. Matsuzawa, S. Toda, K. Yoshida, and H. Katao, Complex microseismic activity and depth-dependent stress field changes in Wakayama, southwestern Japan, *Earth, Planets Space*, 査読有, Vol. 70, No. 21, 2018 DOI:10.1186/s40623-018-0788-6
- ⑥ Yoshida, K., and A. Hasegawa, Hypocenter migration and seismicity pattern change in the Yamagata-Fukushima border, NE Japan, caused by fluid movement and pore pressure variation, *J. Geophys. Res.*, 査読有, Vol. 123, No. 6, 2018, pp. 5000-5017, DOI:10.1029/2018JB015468
- ⑦ Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Yoshida, T. Matsuzawa, Heterogeneities in stress and strength in Tohoku and its relationship with earthquake sequences triggered by the 2011 M9 Tohoku-Oki earthquake, *Pure Appl. Geophys.*, 査読有, Vol. 176, No. 3, 2018, pp. 1335-1355, DOI:10.1007/s00024-018-2073-9
- ⑧ Iidaka, T., T. Igarashi, A. Hashima, A. Kato, T. Iwasaki, and The Research Group for the Joint Seismic Observations at the Nobi Area, Receiver function images of the distorted Philippine Sea slab contact with the continental crust: Implications for generation of the 1891 Nobi earthquake (Mj 8.0), *Tectonophysics*, 査読有, Vol. 717, 2017, pp. 41-50, DOI:10.1016/j.tecto.2017.07.010
- ⑨ Yoshida, K., T. Saito, Y. Urata, Y. Asano, and A. Hasegawa, Temporal changes in stress drop, frictional strength, and earthquake size distribution in the 2011 Yamagata-Fukushima, NE Japan, earthquake swarm, caused by fluid migration, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 査読有, Vol. 122, No. 12, 2017, pp. 10,379-310,397, DOI: 10.1002/2017JB014334
- ⑩ Yukutake, Y., and Y. Iio, Why do aftershocks occur? Relationship between mainshock rupture and aftershock sequence based on highly resolved hypocenter and focal mechanism distributions, *Earth, Planets Space*, 査読有, Vol. 69, No. 68, 2017. DOI:10.1186/s40623-017-0650-2
- ⑪ Shibazaki, B., T. Okada, J. Muto, T. Matsumoto, T. Yoshida, and K. Yoshida, Heterogeneous stress state of island arc crust in northeastern Japan affected by hot mantle fingers, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 査読有, Vol. 121, No. 4, 2016, pp. 3099-3117, DOI:10.1002/2015JB012664
- ⑫ Yoshida, K., A. Hasegawa, and T. Yoshida, Temporal variation of frictional strength in an earthquake swarm in NE Japan caused by fluid migration, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 査読有, Vol. 121, No. 8, 2016a, pp. 5953-5965, DOI:10.1002/2016JB013022

- ⑬ Yoshida, K., A. Hasegawa, and T. Okada, Heterogeneous stress field in the source area of the 2003 M6.4 Northern Miyagi Prefecture, NE Japan, earthquake, *Geophys. J. Int.*, 査読有, Vol. 206, No. 1, 2016b, pp. 408-419, DOI: 10.1093/gji/ggw160
- ⑭ Okada, T., T. Matsuzawa, N. Umino, K. Yoshida, T. Iidaka (15 番目), 計 29 名, Hypocenter migration and crustal seismic velocity distribution observed for the inland earthquake swarms induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in NE Japan: implications for crustal fluid distribution and crustal permeability, *Geofluids*, 査読有, Vol. 15, No. 1-2, 2015, pp. 293-309, DOI:10.1111/gfl.12112
- ⑮ Yoshida, K., A. Hasegawa, and T. Okada, Spatial variation of stress orientations in NE Japan revealed by dense seismic observations, *Tectonophysics*, 査読有, Vol. 647-648, 2015a, pp. 63-72, DOI:10.1016/j.tecto.2015.02.013
- ⑯ Yoshida, K., A. Hasegawa, and T. Okada, Spatially heterogeneous stress field in the source area of the 2011 Mw 6.6 Fukushima-Hamadori earthquake, NE Japan, probably caused by static stress change, *Geophys. J. Int.*, 査読有, Vol. 201, No. 2, 2015b, pp. 1062-1071, DOI:10.1093/gji/ggv068
- ⑰ Yukutake, Y., T. Takeda, and A. Yoshida, The applicability of frictional reactivation theory to active faults in Japan based on slip tendency analysis, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 査読有, Vol. 411, 2015, pp. 188-198, DOI:10.1016/j.epsl.2014.12.005
- ⑱ Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Okada, and T. Iinuma, Changes in the stress field after the 2008 M7.2 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake in northeastern Japan, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 査読有, Vol. 119, No. 12, 2014, pp. 9016-9030, DOI:10.1002/2014JB011291

[学会発表] (計 60 件)

- ① Iwata, T., Stress rotation near the main fault of the 2000 Tottori earthquake, AOGS 15th Annual Meeting, 2018
- ② Okada, T., 他計 13 名, Stress and strength control on the 2016 Kaikoura earthquake inferred from a seismic observation, Annual Meeting of Geoscience Society of New Zealand, 2018
- ③ Yukutake, Y., and Y. Iio, Estimation of heterogeneity of stress field by using misfit angles in focal mechanisms, AGU 2018 Fall Meeting, 2018
- ④ Yoshida, K., A. Hasegawa and T. Matsuzawa, Heterogeneities of stress and strength and its relationship with induced seismic activities associated with the Tohoku-oki earthquake, SSA 2017 Annual Meeting, 2017
- ⑤ Matsuzawa, T., Strategy to evaluate the stress in the crust, CD 2016, 2016
- ⑥ 飯高隆、五十嵐俊博、小原一成、酒井慎一、加藤愛太郎、武田哲也、S 波偏向異方性によるいわき市内陸部における応力場の深さ依存性検出の試み、日本地震学会 2015 年大会、2015

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://cd.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：伊藤 喜宏

ローマ字氏名：(ITO, yoshihiro)

所属研究機関名：京都大学

部局名：防災研究所

職名：准教授
研究者番号（8桁）：30435581

研究分担者氏名：飯高 隆
ローマ字氏名：(IIDAKA, takashi)
所属研究機関名：東京大学
部局名：地震研究所

職名：准教授
研究者番号（8桁）：00221747

研究分担者氏名：岡田 知己
ローマ字氏名：(OKADA, tomomi)
所属研究機関名：東北大学
部局名：大学院理学研究科

職名：准教授
研究者番号（8桁）：00221747

研究分担者氏名：岩田 貴樹
ローマ字氏名：(IWATA, takaki)
所属研究機関名：常盤大学
部局名：人間科学部

職名：准教授
研究者番号（8桁）：30418991

研究分担者氏名：行竹 洋平
ローマ字氏名：(YUKUTAKE, yohei)
所属研究機関名：神奈川県温泉地学研究所
部局名：(無)

職名：研究員
研究者番号（8桁）：20435853

研究分担者氏名：吉田 圭佑
ローマ字氏名：(YOSHIDA, keisuke)
所属研究機関名：東北大学
部局名：大学院理学研究科

職名：助教
研究者番号（8桁）：20743686

(2)研究協力者
研究協力者氏名：岩崎 貴哉
ローマ字氏名：(IWASAKI, takaya)

研究協力者氏名：寺川 寿子
ローマ字氏名：(TERAKAWA, toshiko)

研究協力者氏名：香川 敬生
ローマ字氏名：(KAGAWA, takao)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。