

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24年 6月 5日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21740320

研究課題名（和文） 断層破碎帯内の微細構造に基づく断層強度の推定

研究課題名（英文） Estimation of fault strength based on
fine-scale seismic structure of fault zone

研究代表者

加藤 愛太郎（AITARO KATO）

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：20359201

研究成果の概要（和文）：

2008年岩手・宮城内陸地震の断層破碎帯を横断する測線上で、計120点の地震計を高密度に展開し、約10日間にわたり連続波形記録を取得した。この波形記録を用いたトモグラフィ解析をおこなうことで、断層破碎帯の微細構造を推定した。その結果、既存の断層に対応すると考えられる低速度帯がイメージングされた。これらの低速度帯は地殻内に存在する流体やクラック等を意味している可能性があり、断層強度は低いことが示唆される。

研究成果の概要（英文）：

We deployed a dense seismic array consisting of 120 portable stations, which crossed fault zones associated with the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, and retrieved continuous seismic waveforms during about ten days. Based on tomographic analysis using the waveforms of small earthquakes located close to the array, we estimated a seismic structure of the fault zones. Bands of low-velocity layers were imaged roughly parallel to along pre-existing faults. We interpret that a likely-explanation of these low-velocity layers is presence of crustal fluids or cracks within the fault zones. It is thus inferred that the strength of fault might be weak.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地震、断層、構造、稠密アレイ観測

1. 研究開始当初の背景

地震学の40年来の大論争として、断層強度に関する“heat-flow paradox”が有名である。論争の発端は、サンアンドレアス断層

沿いに局在化した熱流量異常が見られないという観測事実を、Brune(1969)が断層強度と結びつけて解釈した時に始まった。熱流量異常を説明するためには、断層強度が実験室

の摩擦強度から想定される強度よりも遥かに小さくなければならない。その後、地殻内応力測定、メカニズム解に基づく応力分布の推定、岩石の摩擦実験などの研究を通して、学際的な論争に発展した。しかしながら、今日に至るまで大半の研究者が納得する結論は得られていない。その最大の要因として、断層は一枚の面ではなく、内部構造を有する破砕帯であるという認識が欠けている点が挙げられる(Scholz, 2006)。固体物質がせん断変形を被ると、せん断面周辺に有限の幅をもつ破砕帯が形成される。同一の破砕帯が何度も破壊を受けることで粉砕物が充填され、破砕帯の厚みは変形量とともに増大し、破砕帯特有の内部構造も発達する。断層破砕帯に関する研究は、過去の震源域に存在していたと考えられる断層露頭の地質学調査に基づく研究が最初に行なわれた。破砕帯内の岩石の変形パターンから、破砕帯モデルが提案されている(e.g., Sibson, 1977)。最も単純なモデルとして、破砕帯は damaged zone と呼ばれるクラック密度の高い領域の中に、fault core と呼ばれる非常に変形が集中した領域から成るモデルである(e.g., Chester et al., 1993)。fault core は粒度の小さい粉砕物からなるため、透水性が低く流体圧を高压に保持する機能があると想像されている。一方、damaged zone はクラック数が多いため、流体の流路と考えられている。ただし、これらの描像は過去に活動した断層の痕跡から推定されたものであり、活動的な断層破砕帯の微細構造に関する知見を得ることは原理的に困難である。

一方、地球物理学的側面からは、断層帯トラップ波を用いた研究が活断層を対象におこなわれてきた(e.g., Li et al., 2000)。トラップ波とは、断層破砕帯内で発生した地震や人工震源による波が、破砕帯内で多重反射を繰り返すことで励起される波である。しかしながら、トラップ波は直達波に比べて微細な構造に感度が弱く、これまで破砕帯内の微細構造に関する研究はあまりおこなわれていなかった。

2. 研究の目的

断層破砕帯を横断する超稠密な地震観測をおこない連続波形記録を取得する。取得された波形データに対して、初動到達時刻データを用いた走時トモグラフィ解析を適用することで、断層破砕帯内の微細構造を描き出す。推定された断層破砕帯の微細構造モデルと余震活動等から、断層の強度について推察する。

3. 研究の方法

余震活動が見られた2008年岩手・宮城内陸地震の断層破砕帯に着目した。2009年7月

12日～22日の約10日間、この断層帯を横断する測線で超稠密地震計アレイを展開した。観測サイトは、観測前におこなった現地での踏査情報を基に、岩手県一関市厳美町の林道沿いに決定した。断層破砕帯の地表位置を中心に、中央部では地震計を約5m間隔で、徐々に外側へ向けて設置間隔を10m、20m、40mと伸ばし、計120点の地震計を展開した。展開長は約2kmである(図1)。地震計は、固有周期10Hzの3成分一体型速度型地震計を用いた。地震計からの出力信号は、小型の独立型レコーダー(MS2000)を用いて、サンプリングレート500Hzで電子媒体に記録した。レコーダーの内部時計は、GPSにより高精度に自動校正された。独立型レコーダーはバッテリー駆動式である。そのためバッテリー容量の関係で、観測期間の途中でバッテリー交換することで、計約10日間にわたり連続波形記録を取得できた。観測終了後、各観測点で収録された連続波形データのフォーマット変換をおこない、winフォーマットへと変換した。全観測点の連続波形ファイルを統合した後、アレイ周辺の定常観測点の連続波形記録とも統合処理をおこない、約10日間の連続波形記録のデータセットを構築した。

観測期間中に発生した微小地震の検出を2段階でおこなった。まず、連続波形記録に対して、winシステムを用いてSTA/LTA比から、基準地震の検出をおこなった。次に、これらの基準地震と類似なイベントを見つけるために、連続波形記録に対する相互相関解析を適用したMatched filter法(Shelly et al., 2007; Peng and Zhao, 2009)の計算プログラムを作成し、イベント検出を試みた。複数の観測点で観測された基準地震の波形(S波記録)に対して、各観測点の連続波形記録との相関係数を各時間ステップにおいて計算した。基準地震の波形記録に関しては、観測点間の相対走時差を保持しながら連続記録と

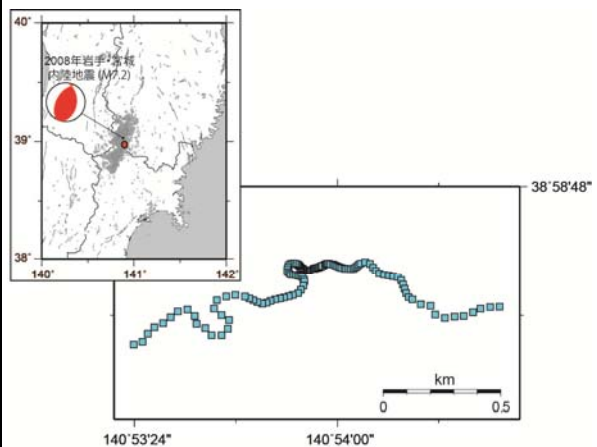


図1. 稠密地震計アレイ観測点の分布図。挿絵は岩手・宮城内陸地震の余震分布(灰色の丸: 気象庁一元化処理震源)とアレイの位置関係を示す。赤丸の位置がアレイの設置領域に対応する。

の相関係数の計算をおこなった。各時間ステップにおいて、全観測点で得られた相関係数の総和を計算し、その値が統計学的に有意な大きさを有する場合にのみ、基準地震と類似のイベントが発生したと考えてイベント検出をおこなった。上記の手法により検出された地震のP波・S波の初動到達時刻の読み取りをwinシステムでおこない、時刻到達データセットを作成した。

4. 研究成果

稠密アレイ近傍で発生した微小地震 42 個を基準地震として用いて、Matched Filter 法を適用することで合計約 600 個のイベントが検出された。解析に使用した時間窓の幅は 4 秒間で、2 - 6 Hz のバンドパスフィルターを通した波形を用いた。図 2 に地震計アレイ近傍で発生した微小地震の波形記録のトレースを示す。明瞭な P 波と S 波の到着が確認でき、S-P 時間からアレイから数 km 以内で発生したイベントであることがわかる。S 波到着後の 1 秒後に、アレイ中央の観測点においてのみ、コヒーレントな波群の到着が確認できる。

これらの微小地震の P 波・S 波の初動走時データを読み取りトモグラフィ解析をおこなうことで、地震波速度構造モデルを構築した。深さ 4 km よりも浅い領域のアレイ直下であれば、数百 m の空間分解能に到達することが確認できた。本研究とほぼ同じ測線で、浅部反射法地震探査が先行研究として実施されている（東大地震研 HP, 第 191 回地震調査委員会資料）。この探査結果によると、花崗岩帯の西縁に対応する餅転-細倉構造線と奥羽山脈東麓の山地丘陵境界部に伏在する山地境界断層が存在することが示されている。山地境界断層は、地殻変動データに基づいて推定された本震の断層モデル（国土地理院）に概ね一致しており、これらの断層が地震に伴って活動したものと考えられている。

本解析の結果、2 つの上記の既存断層に対応すると考えられる低速度帯がイメージされた。具体的には、アレイ直近の山地境界断層に対応した低速度帯と、その深部に位置する餅転-細倉構造線に対応する低速度帯が西に傾斜していることが示された。低速度の度合いは、深さに対して変化を示す。これらの低速度帯以外にも、上記の断層よりも深部に低速度帯が局所的に存在する領域がある。これらの低速度帯は、地殻内に存在する流体やクラック等を意味している可能性があり、断層帯の強度は低いと推測される。また、低速度帯と震源分布の対応を見ても、一部の地震は低速度帯内に存在するが、多くの地震は低速度帯よりも深部に存在する。

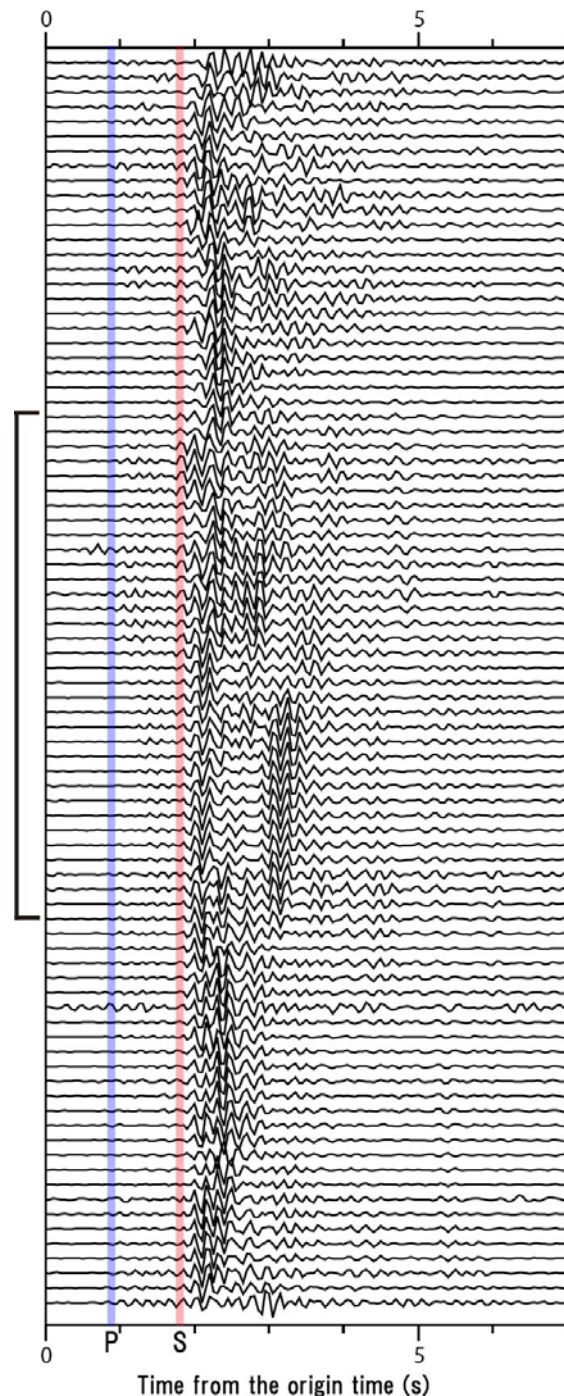


図2. 地震計アレイで捉えられた地震の波形トレース (2 - 6 Hz: 東西成分)を示す。P波とS波の到着時刻を実線で示す。断層破碎帯に概ね相当する観測点で、S波到着後にコヒーレントな波群が捉えられた。

2007 年能登半島地震の余震を用いた応力場の解析から、地殻内の流体が能登半島地震の発生に関与した可能性が指摘されている (Kato et al., 2011)。さらに、非火山性地震活動が活発な領域でも、地震発生に流体が関与していることが示唆されている (Kato et al., 2010)。これらの結果は、本研究で得られた断層帯の性質とも調和的であり、流体が

断層強度を下げることで、地震が起きやすくなった可能性が考えられる。

また、2011年東北地方太平洋沖地震の後に生じた誘発地震について調べることで、断層強度に関する新たな知見が得られた。本震発生の約10分後に、茨城県北部では中規模地震が浅い地殻内で誘発された。茨城県北部の活動は、南西傾斜の面状に配列し、地殻内に既存の弱面の再活動によって地震が起きていると考えられる。東北地方太平洋沖地震の発生前後に起きていた地震のメカニズム解を比較することで、深さ16~17 kmでは応力場の変化が起きていたことを明らかにした。東北地方太平洋沖地震の発生前は東西圧縮場であった領域が、地震後には水平面内の伸張応力場へと変化した可能性が挙げられる。東北沖地震が上盤の浅い領域に引き起こした伸張変形により、このような応力場の変化が生じたと考えられる。さらに、その後も、深さ16~17 kmでは、様々なタイプのメカニズム解の地震が観測されており、断層強度が低いことを示唆する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① Kato Aitaro, Kazushige Obara, Toshihiro Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa and Naoshi Hirata, Propagation of Slow Slip Leading Up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, Science, 査読有, 335, 705-708, 2012.
- ② Kato Aitaro, Shinichi Sakai, Kazushige Obara, A normal-faulting seismic sequence triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: Wholesale stress regime changes in the upper plate, Earth Planets Space, 査読有, 63, 745-748, 2011.
- ③ Kato Aitaro, Shinichi Sakai, Takashi Iidaka, (その他53名, 1番目), Anomalous depth dependency of the stress field in the 2007 Noto Hanto, Japan, earthquake: Potential involvement of a deep fluid reservoir, Geophysical Research Letter, 査読有, 38, L06306, 2011.
- ④ Kato Aitaro, Shinichi Sakai, Takashi Iidaka, Takaya Iwasaki and Naoshi Hirata, Non-volcanic seismic swarms triggered by circulating fluids and pressure fluctuations above a solidified diorite intrusion, Geophysical Research Letter, 査読有, 37, L15302, 2010.

〔学会発表〕(計3件)

- ① 加藤愛太郎, 2011年東北地方太平洋沖地震による茨城県北部・福島県南東部の誘発地震活動, 日本地震学会2011年秋季大会, 2011年10月14日, 静岡.
- ② 加藤愛太郎, 2007年能登半島地震直後の余震活動, 日本地球惑星科学連合2011年大会, 2011年5月27日, 幕張.
- ③ 加藤愛太郎, 高密度観測による非火山性群発地震発生域の特徴~地殻流体と貫入岩の関与, 日本地震学会2010年秋季大会, 2010年10月29日, 広島.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/akato/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 愛太郎 (AITARO KATO)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号: 20359201