

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04141

研究課題名（和文）「地震＝断層運動」からの脱却：新手法による微小な非せん断破壊成分推定の試み

研究課題名（英文）Breaking away from "Earthquake = shear failure": An attempt to estimate subtle non-double couple component through a new method

研究代表者

今西 和俊 (Imanishi, Kazutoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・副研究部門長

研究者番号：70356517

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、クラスター内の地震に Dahm (1996) の相対モーメントテンソル法を繰り返し適用し、個々の地震のモーメントテンソル解の精度を上げると同時に地震間の相対精度も上げていく方法（逐次相対モーメントテンソル法）を開発した。この方法により、参照とする地震のモーメントテンソル解の精度が悪いと信頼性の高い結果が得られないという相対法の本質的な問題点を解決することができた。この方法を複数の地震活動に適用し、地震破壊に含まれる微小な非せん断破壊成分を十分な精度で推定できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した手法を複数の地震活動に適用することで、通常地震の中にも微弱ながらも有意な非せん断破壊成分を持つ地震が存在することが明らかになった。この成果は半世紀以上にわたり認められてきた「地震＝断層運動」という既存概念を書き換えることに繋がる。非せん断破壊成分は流体の関与、大地震発生前の震源核形成、空隙の多い断層帯内での圧密などとの関連が予想される。本研究で開発した手法を活用していく事で、これまで踏み込むことができなかった微視的な地殻プロセスの実態に迫ることができると考える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a method that iteratively applies Dahm's (1996) relative moment tensor inversion to earthquakes within a cluster, improving the accuracy of individual moment tensor solutions as well as the relative accuracy between earthquakes. This method resolves the inherent issue of relative methods, where reliable results cannot be obtained if the reference earthquake's moment tensor solution is inaccurate. We applied this method to several earthquake sequences and demonstrated that it can estimate small non-double couple components of earthquakes with sufficient accuracy.

研究分野：地震学

キーワード：非せん断破壊 逐次相対法 モーメントテンソル解 臨時観測

1. 研究開始当初の背景

地震がどのようなメカニズムで発生しているのかは地震学の本質的課題であり、理論及び観測の両面から精力的に調べられてきた。1960年代には地震は既存弱面（断層面）に沿ったずれ、つまり断層運動（せん断破壊）で説明できることが示され、現在に至るまで半世紀以上にわたりこの考えは支持されてきた。しかし、露頭に見られる断層破碎帯を観察すると、地震が100%せん断破壊で記述できるほど単純なプロセスではないことが伺える。最近になり、シェールガスや地熱開発のように流体注入により誘発される地震では微小ながらも断層面の開口や閉口といった非せん断破壊成分が含まれるという報告がなされている（Vavryčuk & Hrubcová, *J. Geophys. Res.*, 2017）。さらに、前震のみに非せん断破壊成分が含まれる可能性を指摘した興味深い研究も報告され始めている（McLaskey & Lockner, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2018）。観測データが充実してきた現代において、「地震＝断層運動」という既存概念を取り払い、新しい視点で地震現象を見直す時期に差し掛かっている。

震源での運動形態を表すモーメントテンソル解は地震波形データから推定できる。地震波形には地下構造の影響が含まれているため、本研究で対象とするような微小な非せん断破壊成分の存否に迫るためには、正確な3次元地下構造を知っている必要がある。しかし、これは現実的には不可能であるため、十分な信頼度で微小な非せん断破壊成分を推定することは非常に難しい。前述の報告も、構造を正しく評価していないことに起因する artifact ではないかとの反論があるのも事実である。

この問題点を解決するためには、従来とは異なる発想の解析手法が必要となる。有効な方法として、近接する地震ペアの同一観測点における振幅比をデータとする方法がある。データの比を取ることで共通する地震波の伝搬経路（地下構造）の効果をキャンセルできるので、地下構造の詳細は知らずともモーメントテンソル解を推定できる（相対モーメントテンソル法）（Dahm, *Geophys. J. Int.*, 1996）。しかし、この方法（以下、相対法と呼ぶ）で推定できるのは、モーメントテンソル解が既知の地震（マスター地震）に対する相対的な解であるため、マスター地震の解が正しくないと推定対象の地震の解も正しいものが求められないというジレンマを抱えていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、相対法の利点を活かしつつ、相対法の本質的な問題点を克服する手法（逐次相対モーメントテンソル法。以下逐次相対法と呼ぶ）を開発することにある。さらに、この手法を複数の地震活動に適用し、地震破壊に含まれる非せん断破壊の実態を解明するとともに、背後の物理機構に迫ることを目指す。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、以下のことを実施する。

- (1) 様々な数値実験を行い、逐次相対法を確立させる。
- (2) 逐次相対法の前データとなる波形の振幅値が、微小地震のモーメントテンソル解推定にも使えるかどうかを確認するために、事例研究を行う。
- (3) 逐次相対法の実データへの適用例として、2014年長野県北部の地震の前震活動、広島県西部直下の下部地殻地震クラスターを対象とする。解析には定常観測網のデータを利用する。
- (4) 非せん断破壊成分が含まれることが予想される火山性の地震として、伊豆半島東部（静岡

県伊東市周辺)の地震を対象にする。より精度の高い結果を得るために、周辺域で臨時観測を実施する。

4. 研究成果

(1) 手法開発

① 逐次相対法

逐次相対法の概念図を図1に示す。この方法にはポイントが2つある。一つ目は、マスター地震として1つの地震ではなく、複数の地震を使用する点である(図1の(2))。これにより、推定精度の悪い特定のマスター地震のモーメントテンソル解に引きずられることを緩和させる効果がある(相対法固有の欠点を克服)。2つ目は相対法を繰り返し適用する点である。繰り返しにより、各々のモーメントテンソル解が徐々に真の解に近づいていくことが期待される。実際に数値実験により、初期解が真の解から離れていても、解が収束することを確認した(図2)。その他、地震ペアの距離がどの程度離れていても許容できるか、近接地震は何個以上あるのが妥当か、一般的な定常観測網の観測点配置の場合、どの程度小さな非せん断破壊成分を十分な精度で推定可能であるかを系統的に調べた。

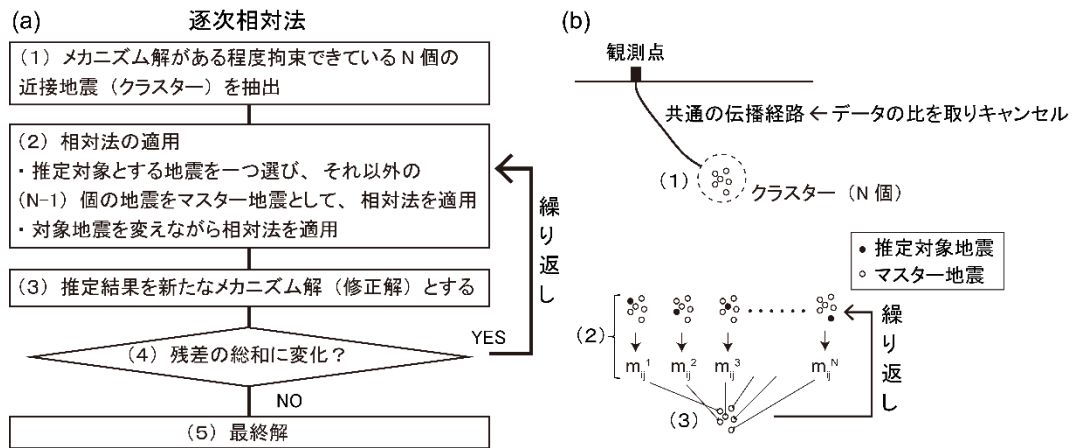


図1 逐次相対法。(a) フローチャート。全ての地震が推定対象であり、マスター地震でもある。(b) (1)~(3)のステップの概念図。

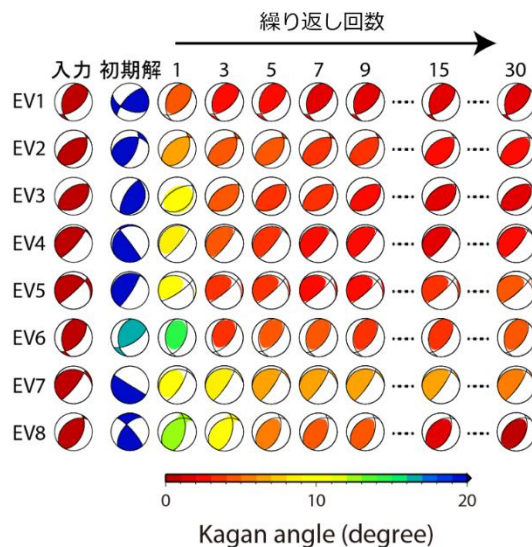


図2 数値実験の一例(約30km四方に観測点が12点、地震数は8地震、地震は深さ10kmにクラスターとして存在)。ビーチボールの色が暖色系になるほど、真の解に近いことを示す。相対法を繰り返すごとに、真の解に近づいていく様子がわかる。

②波形の振幅値の活用

P波やS波の振幅値の求め方はいくつかあるが、本研究では振幅スペクトルに ω^2 モデルをあてはめて、コーナー周波数とQ値をグリッドサーチしながら低周波側のスペクトルレベル（観測振幅値）を最小二乗法により推定する手順を取った。コーナー周波数とQ値には強いトレードオフが存在しているが、スペクトルの低周波側で決定される観測振幅値にはこのトレードオフの影響がほとんど無く、正確に推定できることが分かった。このような手順で推定した観測振幅値を用いて2013年淡路島の地震（M6.3）の周辺域の活動（Imanishi et al., EPS, 2020）や中国地域の地震活動（今西ほか, 地質調査研究報告, 2021）に適用し、それぞれの地域の応力場を求めた。

（2）実データへの適用

①2014年長野県北部の地震の前震活動への適用

2014年長野県北部の地震（M6.7）では、本震の4日前から顕著な前震活動が見られた（Imanishi & Uchide, GRL, 2017）。前述の通り、先行研究では前震活動に非せん断破壊成分を持つ地震が起きた事例が報告されていることから、長野県北部の地震の前震活動及び周辺の余震活動に逐次相対法を適用した。その結果、前震も余震も推定誤差を有意に超える非せん断破壊成分は確認できなかった。前震の震源特性に特異性があるかどうかを確認するためには、定常観測網の観測点密度では不十分であり、稠密観測が必要である可能性がある。

②広島県西部直下の下部地殻地震クラスターへの適用

様々な状況証拠から、流体関与が示唆される広島県西部直下の下部地殻地震クラスターの解析を行った。この活動はモホ面直上の30km前後という深いところでクラスターの起きているとされており、以前から不思議な活動として知られていた。マグニチュード1以上の200強のイベントを対象に、逐次相対法を適用した。その結果、微小ではあるものの推定誤差を有意に超える非せん断破壊成分（開口と閉口成分）が確認され、クラックの開口・閉口成分が約9年の周期で変動する傾向があることがわかった。また、地震波スペクトルから応力降下量の推定も行ったところ、応力降下量の大きい地震は開口成分が卓越するタイミングに、一方で応力降下量の小さい地震は閉口成分が卓越するタイミングに、それぞれ概ね調和して発生する傾向があることがわかった。この対応関係を説明するため、以下のような流体注入と絡めたモデルを考案した。

・平常時：クラックが流体で満たされている状態を考える。これらのクラックにおいて破壊条件が満たされると、せん断破壊とともにクラックが閉じて流体を放出すると考えられる。これらのクラックは間隙水圧による強度低下が生じていたため、応力降下量は小さめになると考えられる。

・深部からの流体注入時：一方、地下から流体が注入される際には、閉じていたクラックに流体が入り込み始めて、クラックをこじ開けるような破壊が生じることが予想される。この際、もともとクラックに流体は入っておらず強度低下は生じていなかったため、比較的大きな応力降下量を示すと考えられる。

③伊豆半島東部における臨時観測

数値実験による検討を踏まえ、非せん断破壊成分を推定する上で適切な観測点配置になるように、1Hzの地震計を5か所に設置した。観測開始後、小規模ではあるが、M1.8を最大とする活動が臨時観測点直下で発生し、良質なデータを取得できた。補助事業期間は終わってしまったが、質の高いデータが取得されていることから、臨時観測を別予算で継続中であり、引き続き取得したデータの解析を進めていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Imanishi Kazutoshi、Ohtani Makiko、Uchide Takahiko	4. 巻 72
2. 論文標題 Driving stress and seismotectonic implications of the 2013 Mw5.8 Awaji Island earthquake, southwestern Japan, based on earthquake focal mechanisms before and after the mainshock	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-020-01292-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 今西和俊・内出崇彦・椎名高裕・松下レイケン・中井未里	4. 巻 72
2. 論文標題 中国地域の地殻内応力マップの作成	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地質調査研究報告	6. 最初と最後の頁 23-40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 今西和俊
2. 発表標題 地震のせん断破壊成分推定の試み
3. 学会等名 SF地震学ミニ研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今西和俊・内出崇彦
2. 発表標題 下部地殻微小地震の発生メカニズム：広島県西部直下の深部クラスター活動の事例
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Imanishi Kazutoshi、Ohtani Makiko、Uchide Takahiko
2. 発表標題 Driving stress of the 2013 Mw5.8 Awaji Island earthquake, Japan, inferred from well-constrained focal mechanisms and its seismotectonic implication
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今西和俊・内出崇彦・椎名高裕・松下レイケン・中井未里
2. 発表標題 中国地域の地殻内応力マップの作成と活断層の活動性評価
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------