

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04030

研究課題名（和文）遠地実体波の解析による大地震の断層面形状とすべり分布の同時推定手法の開発

研究課題名（英文）Simultaneous estimation of fault geometry and slip distribution for large earthquakes by analysis of tele-seismic body waves

研究代表者

八木 勇治（Yagi, Yuji）

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：50370713

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、遠地実体波を用いて断層面形状と断層曲面上の断層すべりの時空間分布を同時に求める新しい震源過程解析手法であるポテンシー密度テンソルインバージョン法を開発した。まず数値実験により、ポテンシー密度テンソルインバージョン法の妥当性を検討し、震源メカニズム解の分布を安定に推定できることを示した。その後、実地震データに適用して、断層形状を復元できること、断層形状の変化によって破壊伝播が不規則になることをデータ解析から明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大地震の破壊がどのように成長していったのかを記述する震源過程モデルは、震源の物理を議論する上で基礎情報となっている。一方で、仮定した断層モデルや解析手法の違いによって異なる解が得られることが指摘されており、震源過程モデルから震源の物理を議論する上でのボトルネックになっている。本研究は、従来の震源過程解析で設定する必要がある断層面を設定することなく、モデル平面を設定することで断層形状と断層すべりの時空間分布を推定する新手法を開発した。これによって、複雑な地震の震源過程を安定に解析することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：In this study, a new source process analysis method, the Potency Density Tensor Inversion method, was developed to simultaneously estimate the fault geometry and the spatiotemporal distribution of fault slip on the fault surface using tele-seismic body waves. First, the validity of the potency density tensor inversion method was investigated through numerical experiments. It was shown that the distribution of the focal mechanism solution can be stably estimated. It was then applied to real seismic data, and the data analyses showed that the fault geometry can be reconstructed and that changes in the fault geometry lead to irregular rupture propagation.

研究分野：地震学

キーワード：震源過程 高自由度モデル

1. 研究開始当初の背景

大地震の破壊がどのように成長していったのかを記述する震源過程モデルは、震源の物理を議論する上で基礎情報となっている。一方で、仮定した断層モデルや解析手法の違いによって異なる解が得られることが指摘されており、震源過程モデルから震源の物理を議論する上でのボトルネックになっている。私たちは、これまで震源過程解析に含まれる仮定を注意深く検討し、解析手法の高度化を図ってきた。例えば、グリーン関数には必ず誤差が含まれることに着目し、その影響をモデリング誤差として世界で初めて明示的に解析に取り入れ、震源過程解析の分野に革新を引き起こした。

一連の研究でまだ解決できていない重要な課題として、断層面の設定の問題がある。例えば、横ずれ断層の運動によって生じる遠地実体波は、走向や傾斜のわずかな変化によって大きく変化するという特性があり、単純な平面断層を仮定して解析すると得られる解は歪められてしまう。断層面の設定によって生じるモデリング誤差をデータの共分散行列として解析に導入することによりこの問題を軽減することは可能であるが、このアプローチを用いる限り、観測データに含まれている断層面の情報を取り出すことができない。震源断層の走向や傾斜がどのように変化するのは、断層の形成過程、大地震の核形成過程や地震時の動的な破壊伝播過程を理解する上でも重要であり、観測データから直接的に求める必要性は高い。

2. 研究の目的

従来の震源過程解析では、適当な断層面を設定して、その断層面上でのすべりの時空間分布を求めている。断層面形状が湾曲していると考えられる場合に、複数の平面断層を設定して解析している研究は少なくないが、仮定した平面断層の設定により解が大きく変化してしまう問題は依然として残る。中には断層面形状を逐次的に求める研究もあるが、断層すべり方向が設定した断層面上に限られるためか、その試みはあまりうまくいっていない。

本研究では、大地震がどのような断層面形状を有し、断層面形状と断層すべりの時空間分布がどのような関係にあるのかを明らかにするために、遠地実体波を用いて断層面形状と断層曲面上の断層すべりの時空間分布を同時に求める新しい震源過程解析手法を開発する。

3. 研究の方法

震源過程を推定する手法として広く普及している有限断層モデルは、仮定した断層面上の断層滑りポテンシー密度関数として推定している。本研究では、仮定するモデル平面周辺の断層滑りをポテンシーテンソル密度テンソルとして推定する、ポテンシー密度テンソルインバージョン (Potency Density Tensor Inversion: PDTI) を提案する。PDTI では、断層面を設定する必要がないため、断層面の設定が困難な複雑な地震の震源過程を少ない仮定で解析することが可能になる。

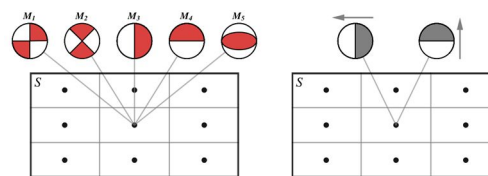


図 1 左のパネルは本研究でのモデル設定で5つの規定ダブルカップルで断層滑りを表現している。左のパネルは従来の方法で二つのダブルカップルで断層面上での滑りを表現している。

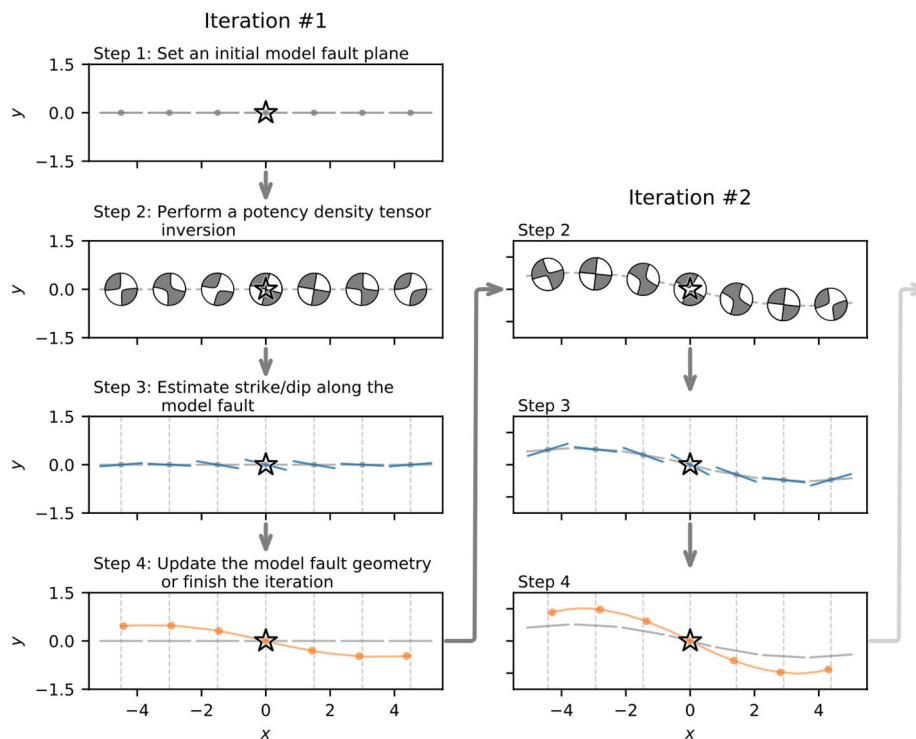


図2 断層面を推定するためのモデル面の更新方法、モデル断層面を設定し、ポテンシー密度テンソル分布を求め、その値を使って断層面の走向もしくは傾斜を推定し、モデル断層面の形状を更新していくことで、適切な断層面形状を推定する。

具体的には、従来の手法では、設定した断層面と平行な方向にのみずべることができると考え、2つのダブルカップル成分についてその大きさを求めているが、新たに提案する手法では、5つのダブルカップル成分全てについてその大きさを求めるように拡張することで、設定したモデル面に平行でない方向も含めて自由に断層すべりが生じることができるようにする(図1)。

さらに、初期に単純なモデル平面を設定して、その面上でモデル面に平行でない方向も含めて自由に断層すべりが生じることができるようにし、引き続いて、その断層すべりが指し示す方向と整合的なようにモデル曲面を構成していく(図2)。

4. 研究成果

(1) ポテンシーテンソル密度インバージョン (PDTI) の開発

本研究では、まず、PDTIの開発を行った。手法の有効性を確認するために、まずは、仮想的な震源過程モデルを設定してモデルがどのように再現されるのかについて数値実験を用いて検討を行った。4つの震源メカニズムを持つインプットモデルを設定してPDTIによってどのような結果が得られるのかを検証した。入力する合成波形には、グリーン関数の誤差とバックグラウンドノイズの成分を加えた。数値実験の結果から、振幅は入力モデルに

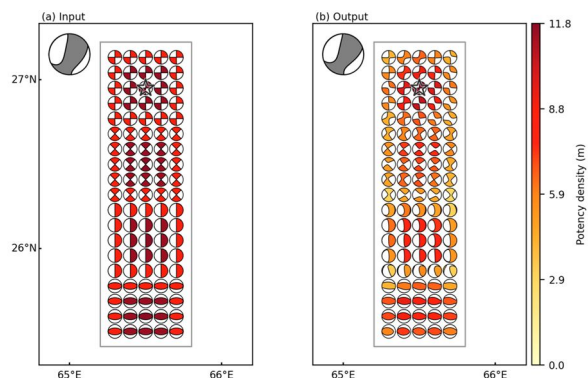


図3 様々な断層メカニズムを持つ震源過程モデルを入力した時の出力結果

比べて小さくなるものの、震源メカニズムのパターンは再現できることが確認できる（図 3）。また、隣の震源メカニズム解が異なる場合は、非ダブルカップル成分が大きくなる傾向があることが確認できる。

開発した手法を、2013 年 Balochistan 地震に適用した結果、湾曲した断層面に対応する震源メカニズム解の変化を得ることに成功した。また、PDTI を複雑な断層帯で発生した複数の地震に適用したところ、地表断層に対応する震源メカニズム解の分布を得ることができ、複雑な断層形状が破壊伝播に影響を与え、結果として破壊の急加速や急減速、破壊伝播方向が反転するなど、不規則な破壊伝播が得られることが明らかになった。

（2）断層面形状と断層曲面上の断層すべりの時空間分布の同時推定

従来の有限断層インバージョン解析では、断層面を設定してポテンシー密度分布に対応する断層滑り分布を推定しているのに対して、PDTI では、モデル平面を設定してポテンシー密度テンソル分布を推定している。PDTI は断層面を設定していないことで、安定に複雑な断層形状を有する地震を解析することができるが、断層面を設定しないため、得られた結果から断層滑り量や破壊伝播速度を議論することは難しい。PDTI を用いて断層面を推定する手法を提案した。まず数値実験でその有用性を示した後に、実地震に適用した、図 4 に、2013 年 Balochistan 地震に適用した結果として得られた断層形状と地表付近の滑り量分布と他の研究との結果との比較を示す。遠地実体波のみから、現地調査や InSAR の解析結果と同等の Balochistan 地震の断層形状と滑り量分布が再現されていることがわかる。ここで重要なのは、PDTI を用いた断層面形状と断層曲面上の断層すべりの時空間分布の同時推定では、静的な断層滑りではなく、動的な断層滑りつまり破壊伝播を伴う地震の情報を推定することができる点である。このような全く新しい解析手法は、これまでの震源過程の解析手法の常識を打ち破るものであり、今後の発展が期待できる。

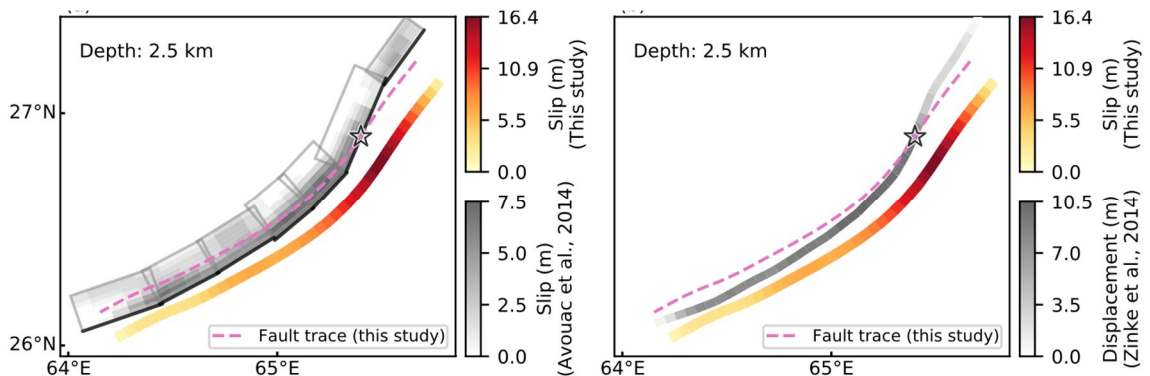


図 4 左の図は、本研究で得られた断層形状と滑り量分布を Avouac et al., (2014, doi: 10.1016/j.epsl.2014.01.036)の結果と比較した図、右の図は、本研究の結果と Zinke et al., (2014, doi:10.1002/2014GC005538) の結果と比較した図。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yamashita Shinji, Yagi Yuji, Okuwaki Ryo	4. 巻 12
2. 論文標題 Irregular rupture propagation and geometric fault complexities during the 2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4575
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-08671-6	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 Okuwaki Ryo, Hicks Stephen P., Craig Timothy J., Fan Wenyuan, Goes Saskia, Wright Tim J., Yagi Yuji	4. 巻 48
2. 論文標題 Illuminating a Contorted Slab With a Complex Intraslab Rupture Evolution During the 2021 Mw 7.3 East Cape, New Zealand Earthquake	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2021GL095117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021GL095117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hu Yaping, Yagi Yuji, Okuwaki Ryo, Shimizu Kousuke	4. 巻 227
2. 論文標題 Back-propagating rupture evolution within a curved slab during the 2019 Mw 8.0 Peru intraslab earthquake	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1602-1611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggab303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 野末 陽平、深畑 幸俊	4. 巻 75
2. 論文標題 基底関数展開による変位場推定におけるボックスカー関数と3次B-スプライン関数の比較	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地震 第2輯	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4294/zisin.2021-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimizu Kousuke, Yagi Yuji, Okuwaki Ryo, Fukahata Yukitoshi	4. 巻 224
2. 論文標題 Construction of fault geometry by finite-fault inversion of teleseismic data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1003 ~ 1014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggaa501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamashita Shinji, Yagi Yuji, Okuwaki Ryo, Shimizu Kousuke, Agata Ryoichiro, Fukahata Yukitoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Consecutive ruptures on a complex conjugate fault system during the 2018 Gulf of Alaska earthquake	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-85522-w	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 Tadapansawut Tira, Okuwaki Ryo, Yagi Yuji, Yamashita Shinji	4. 巻 48
2. 論文標題 Rupture Process of the 2020 Caribbean Earthquake Along the Oriente Transform Fault, Involving Supershear Rupture and Geometric Complexity of Fault	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL090899	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okuwaki Ryo, Hirano Shiro, Yagi Yuji, Shimizu Kousuke	4. 巻 547
2. 論文標題 Inchworm-like source evolution through a geometrically complex fault fueled persistent supershear rupture during the 2018 Palu Indonesia earthquake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 116449 ~ 116449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2020.116449	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hicks Stephen P., Okuwaki Ryo, Steinberg Andreas, Rychert Catherine A., Harmon Nicholas, Abercrombie Rachel E., Bogiatzis Petros, Schlaphorst David, Zahradnik Jiri, Kendall J-Michael, Yagi Yuji, Shimizu Kousuke, Sudhaus Henriette	4. 巻 13
2. 論文標題 Back-propagating supershear rupture in the 2016 Mw 7.1 Romanche transform fault earthquake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Geoscience	6. 最初と最後の頁 647 ~ 653
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41561-020-0619-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shimizu Kousuke, Yagi Yuji, Okuwaki Ryo, Fukahata Yukitoshi	4. 巻 220
2. 論文標題 Development of an inversion method to extract information on fault geometry from teleseismic data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1055 ~ 1065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggz496	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tadapansawut Tira, Yagi Yuji, Okuwaki Ryo, Yamashita Shinji, Shimizu Kousuke	4. 巻 9
2. 論文標題 Complex rupture process on the conjugate fault system of the 2014 Mw 6.2 Thailand earthquake	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-022-00484-5	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2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Kousuke Shimizu, Yuji Yagi and Ryo Okuwaki
2. 発表標題 Proving Fault Geometry with Finite-Fault Inversion of Teleseismic Data
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinji Yamashita, Yuji Yagi, Ryo Okuwaki and Kousuke Shimizu
2. 発表標題 Rupture Process of The MW7.9 2018 Alaska Earthquake Revealed by Flexible Finite-Fault Inversion of Teleseismic Data
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究分担者	深畑 幸俊 (Fukahata Yukitoshi) (10313206)	京都大学・防災研究所・准教授 (14301)	

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
---------	---------