

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05539

研究課題名（和文）3次元的に分布させたモーメントテンソルによる次世代震源過程解析手法の開発

研究課題名（英文）Development of a next-generation seismic source inversion method using volumetrically distributed moment tensor

研究代表者

深畑 幸俊（Fukahata, Yuki-toshi）

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：10313206

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：地震の滑り分布を推定する際には、適当な平面断層を仮定して解析することが標準的な手法となっているが、実際の地震はしばしばもっと複雑であり、最近の高精度な観測データとのずれが問題となっている。本研究では、2016年熊本地震について二枚の断層面を設定し、滑り分布の推定と同時に各断層面の最適傾斜角を求めたことに加え、5つの自由度を持つモーメントテンソルを2次元的な断層面上に分布させて震源過程を推定する定式化を行い実際の地震に適用し有効性を確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東北地方太平洋沖地震や熊本地震など、大地震が発生した際にはその滑り分布を的確に推定することが重要であり、求められた地震の滑り分布は、TVなどの報道でもしばしば目にする。しかし、標準的な解析手法は一枚の平面断層というかなり強い制限をかけており、得られた結果の信頼度もまた限定的である。本研究では、モデルの自由度を広げることによってより適切な解を選択することを行った。より良い滑り分布は、地震の物理の基礎的理解の進展に寄与するだけでなく、余震や将来の大地震発生予測などにも生かされる重要な情報となる。

研究成果の概要（英文）：A flat fault plane is usually assumed in estimating slip distribution of an earthquake. However, actual seismic faults often have more complicated geometry, as suggested by recent observation with high resolution. In this study, we simultaneously estimated fault dip angles and slip distribution of the 2016 Kumamoto earthquake, which happened on two different fault planes. We also developed a new inversion method, in which moment tensors that can express slip of arbitrary directions (not confined to the directions parallel to the fault plane) were used to express slip on an assumed fault plane, and showed the validity of the method through synthetic tests and application to real seismic data.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：インバージョン解析 震源過程 モーメントテンソル 断層面形状

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地震時にどのように破壊が進行したのかを記述する震源過程モデルは、地震発生の物理を理解する上で最も基礎的な情報の一つであり、地震のスケーリング則や摩擦パラメタの推定等も、震源過程モデルの研究の上に成り立っている。最近では、地震発生後に複数の機関から震源過程モデルが発表されるなど、震源過程の推定は定常業務のようにさえ成りつつある。その一方、同様のデータを使用しているにも関わらず、研究者によってしばしば結果が大きく異なることは、従来の解析手法に問題があることを示している。

近年になって、観測技術の向上と観測網の整備、計算技術の進歩により、高精度かつ大量の観測データを解析に使用できるようになってきた。しかし、震源過程解析では、断層滑りがあらかじめ設定した断層面上でのみ起こると一般に仮定されてきた。そのため、モデルの自由度が極めて限られ、観測データが示唆する震源過程の複雑さを十分に表現できないという問題が顕在化しつつある。この問題を軽減するために、震源域を複数の平面もしくは曲面の断層面で表現するといった複雑化が図られているが、断層面を仮定すること自体は同じであるため、モデルの自由度は基本的に低いままであった。

### 2. 研究の目的

観測データは質量共に近年大きく向上してきたが、震源過程解析では、あらかじめ設定した面上でのみ断層滑りが起こると、これまで一般に仮定されてきた。そのため、モデルの自由度が極めて限られ、近年の観測データが示唆する震源過程の複雑さを表現できない。本研究では、モーメントテンソルの適切な利用や断層面の向きを仮定を取り払うなど、より自由度の高いモデルを構築することによって、震源過程解析手法の高度化と一般化を目指した。

### 3. 研究の方法

次項の「研究成果」で述べた成果はいずれも ABIC (赤池のベイズ情報量規準) に基づくインバージョン解析手法を応用したものである。即ち、地震学的あるいは測地学的手法により得られた観測データとすべり場は滑らかであるという先験的情報をベイズの定理によって結合し、両者の最適な重みを ABIC 最小の規準により選択することで解を求めている。本研究のポイントはそもそもの解空間の設定にあるが、それは扱う問題ごとに異なっており、次項で個別に説明する。

### 4. 研究成果

3次元的に分布させたモーメントテンソルという非常に一般的なモデルの構築には至らなかったが、複数断層面における最適傾斜角まで含めた探索(1)や準曲面断層の構築による震源過程解析(2)など、震源過程解析モデルの一般化と高度化という広義の目的は果たせた。

(1) Fukahata & Wright (2008, GJI)で開発した弱非線形インバージョン解析手法を複数断層の場合に拡張した。開発した手法を、布田川断層と日奈久断層という二つの異なる断層で地震すべりが生じた2016年熊本地震について、ALOS-2(だいち2号)によって観測されたInSARデータに適用し、断層傾斜角と滑り分布を同時に推定するインバージョン解析を行った。その結果、布田川断層と日奈久断層の最適傾斜角はそれぞれ  $61^{\circ} \pm 6^{\circ}$ 、 $74^{\circ} \pm 12^{\circ}$  と推定された。滑り分布については、布田川断層では最大滑りが5 m以上に達し、横ずれ成分に加え顕著な正断層成分が推定された一方、日奈久断層については最大滑りが約2.5 mでほぼ純粋な横ずれ断層運動であった。また、大きな被害のあった阿蘇カルデラ西縁で、局所的にすべり量が大きくなっていることが分かった。得られた成果はEarth Planets Space誌に発表した(Fukahata & Hashimoto, 2016)。

(2) 2次元的な断層面上に任意の向きに断層すべりを表すことのできる5つの自由度を持つモーメントテンソルを分布させて震源過程を推定する定式化を行った。これまで、2次元的な断層面上では、力源の自由度を断層面に平行な剪断2成分に限っていたところ、自由度が5成分に上がったところがポイントである。開発した手法を、カーブした地表地震断層が観察された2013年パキスタン・バローチスタン地震 (Mw 7.7) の遠地実体波データに適用した。その結果、推定されたモーメントテンソルが示す断層の運動方向が、現地の活断層調査や衛星画像解析による地表面変位の分布と調和的な結果が得られた。本手法のポイントは、断層面の位置の誤差よりも、その向きの誤差の方が遠地実体波データの解析にとって重要であることに気付いた点にある。得られた成果はGeophysical Journal International誌に発表した(Shimizu et al. 2020)。

(3) 直接的先験拘束条件と間接的先験拘束条件を併用して使用する際に、両者が特別な関係を満たしていないと確率密度関数の表現が非常に複雑で使いにくいものになってしまう問題があった。この問題に対し、直接的先験拘束条件を観測データの一部として取り扱うことを発想し、特別な関係を満たさない一般の場合に対して定式化を行い、得られた成果を2018年日本地震学会秋季大会、および2018年アメリカ地球物理学連合秋季大会で発表した。

(4) 2018年9月に英国オックスフォード大学で開催された研究集会 "RAS/COMET Discussion Meeting to Celebrate the Career of Professor Barry Parsons" で講演を依頼され、上記の研究成果ならびにこれまで行ってきた一連のインバージョン解析手法の開発について発表した(Fukahata, 2018)。2019年日本地球惑星科学連合大会においても招待講演を依頼され、「A bad inversion result suggests bad modeling: 悪いインバージョン結果には理由がある」と題して、モデルの自由度を適切に上げつつ如何にしてより良いモデル推定を行うか、これまで行ってきた一連のインバージョン解析手法の開発について解説した(深畑・八木, 2019)。

#### <引用文献>

- Fukahata, Y., Invention of inversion methods using ABIC: Discovery of the importance of modelling errors, RAS/COMET Discussion Meeting to Celebrate the Career of Professor Barry Parsons, 13th-14th Sep. 2018, Oxford. (招待講演)
- Fukahata, Y. & Hashimoto, M., 2016. Simultaneous estimation of the dip angles and slip distribution on the faults of the 2016 Kumamoto earthquake through a weak nonlinear inversion of InSAR data, *Earth Planets Space*, **68**:204, doi: 10.1186/s40623-016-0580-4.
- Fukahata Y. & Wright, T.J., 2008. A non-linear geodetic data inversion using ABIC for slip distribution on a fault with an unknown dip angle, *Geophys. J. Int.*, **173**, 353-364.
- 深畑幸俊, 八木勇治, A bad inversion result suggests bad modeling: 悪いインバージョン結果には理由がある, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 2019 年 5 月, 千葉.(招待講演)
- Shimizu, K., Yagi, Y., Okuwaki, R. & Fukahata, Y. 2020. Development of an inversion method to extract information on fault geometry from teleseismic data, *Geophys. J. Int.*, **220**, 1055-1065, doi: 10.1093/gji/ggz496.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 Yukitoshi Fukahata and Manabu Hashimoto	4. 巻 68
2. 論文標題 Simultaneous estimation of the dip angles and slip distribution on the faults of the 2016 Kumamoto earthquake through a weak nonlinear inversion of InSAR data	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 204
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-016-0580-4	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 Yuji Yagi, Ryo Okuwaki, Bogdan Enescu, Amato Kasahara, Ayumu Miyakawa and Makoto Otsubo	4. 巻 68
2. 論文標題 Rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake in relation to the thermal structure around Aso volcano	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-016-0492-3	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 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 無
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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 2件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Yukitoshi Fukahata
2. 発表標題 A convenient method for a joint use of direct and indirect prior information in inversion analyses
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukitoshi Fukahata
2. 発表標題 Invention of inversion methods using ABIC: Discovery of the importance of modelling errors
3. 学会等名 RAS/COMET Discussion Meeting to Celebrate the Career of Professor Barry Parsons (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水宏亮、八木勇治、奥脇亮、深畑幸俊
2. 発表標題 モーメントテンソルの時空間分布を推定するインバージョン解析法の開発: 2013年パキスタン・パローチスターン地震への適用
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kousuke Shimizu, Yuji Yagi, Ryo Okuwaki, Yukitoshi Fukahata
2. 発表標題 Development of an Inversion Analysis Method to Estimate Spatiotemporal Potency Tensor Distribution on a Fault
3. 学会等名 10th ACES International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水宏亮・八木勇治・奥脇亮・深畑幸俊
2. 発表標題 ポテンシーテンソルの時空間分布を推定するインバージョン解析法の開発: 2013年パキスタン・パローチスターン地震への適用
3. 学会等名 2018年度日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kousuke Shimizu, Yuji Yagi, Ryo Okuwaki, Yukitoshi Fukahata
2. 発表標題 Development of an inversion method to extract information on fault geometry from teleseismic data
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 深畑幸俊、八木勇治
2. 発表標題 A bad inversion result suggests bad modeling: 悪いインバージョン結果には理由がある
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukitoshi Fukahata, Manabu Hashimoto
2. 発表標題 Simultaneous estimation of the dip angles and slip distribution on the two active faults of the 2016 Kumamoto earthquake
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yukitoshi Fukahata, Manabu Hashimoto
2. 発表標題 Simultaneous estimation of the dip angles and slip distribution on the two active faults of the 2016 Kumamoto earthquake through a weak non-linear inversion of InSAR data based on ABIC
3. 学会等名 IAG-IASPEI 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 深畑幸俊、石須慶一
2. 発表標題 直接的先験拘束条件を使用する場合の便法について
3. 学会等名 2017年度地震学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 清水宏亮、八木勇治、奥脇亮、深畑幸俊
2. 発表標題 モーメントテンソルの時空間分布を推定するインバージョン解析法の開発: 2013年バキスタン・パローチスターン地震への適用
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 深畑幸俊、橋本学
2. 発表標題 ABICを用いたInSARデータのインバージョン解析による熊本地震の滑り分布と断層傾斜角の同時推定
3. 学会等名 日本地震学会2016年度秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yuji Yagi, Ryo Okuwaki, Bogdan Enescu, Amato Kasahara, Ayumu Miyakawa and Makoto Otsubo
2. 発表標題 Rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake in relation to the thermal structure around Aso volcano
3. 学会等名 アメリカ地球物理学会 (国際学会)
4. 発表年 2016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	八木 勇治  (Yagi Yuji)  (50370713)	筑波大学・生命環境系・教授    (12102)	