

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540450

研究課題名(和文) モデルの不確定性を考慮した新世代のマルチデータ震源過程解析手法の開発

研究課題名(英文) Introduction of uncertainty of Green's function into multi-data inversion for seismic source processes

研究代表者

八木 勇治 (YAGI, Yuji)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：50370713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：地震の破壊伝播過程である震源過程を明らかにすることは、地震という現象を理解する上で鍵となる。近年、地震観測網が整備されると共に、衛星測位技術の進歩により地震時の地殻変動が面的に得られるようになった。それら大量の良質なデータは震源過程の詳細な情報を含んでいる。分解能が高いデータほど、モデルの変化に敏感であるが故に、モデル誤差の取り扱いが重要になってくるが、それらはあまり議論されてこなかった。モデル誤差を考慮した新世代のマルチデータ解析手法を開発することを試みると同時に、モデル誤差の影響を受けにくい新しい方法を開発し、その手法の理論的な背景とインバージョン法との関係について議論を行った。

研究成果の概要(英文)：Seismic source models are essentially important to reveal the characteristics of earthquakes. Now, the waveform inversion becomes a popular tool to construct seismic source models. As pointed out by some researchers, however, seismic source models for the same earthquake are often quite different from one another. This suggests that the existing formulations of the inverse problem have some crucial flaws. In principle, we can never know the true Green's function, which is a major error source in seismic source inversion. Therefore, we introduce uncertainty of Green's function into seismic source inversion analyses, and then proposed the multiple data integration method. In addition to this, we developed a hybrid back-projection method to estimate stable seismic source image.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：震源過程解析 モデル誤差

## 1. 研究開始当初の背景

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、地震のスケールリング則や摩擦パラメータの推定等も、震源過程モデルの研究の上に成り立っている。例えば、東北地方太平洋沖地震が何故発生したのか理解するには、正確な震源過程モデルが不可欠である。

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 (Mai et al., 2009)。加えて、複数種のデータを使用した解析では、各種データ間の重みをどのように決めるかが問題となる。

近年の高品質かつ高分解能なデータは、モデルの変化に敏感であるが故に、モデル誤差の取り扱いが重要となる。モデル誤差は時空間的に強い相関を持つため、モデル誤差に由来する共分散成分を無視して解析すると、シグナルと誤差が混同されてしまい、バイアスのかかった結果が得られることになる。しかし、モデル誤差の項は、これまで遠地実体波の解析に対してのみ導出されており、測地データや近地強震動の解析に関してはほとんど検討されていない。つまりデータの質の向上に、解析する理論が追いついていないのが現状であった。

## 2. 研究の目的

地震の破壊伝播過程である震源過程を明らかにすることは、地震という現象を理解する上での鍵となる。近年、幅広い周波数領域をカバーする空間的にも密な地震観測網が整備されると共に、衛星測位技術の進歩により地震時の地殻変動が面的に得られるようにもなった。それら大量の良質なデータは震源過程の詳細な情報を含んでいる。

一般に、分解能が高いデータほど、モデルの変化に敏感であるが故に、モデル誤差の取り扱いが重要になってくるが、それらはあまり議論されてこなかった。

本研究では、モデル誤差を考慮した新世代のマルチデータ解析手法を開発することを試みると同時に、モデル誤差の影響を受けにくい新しい手法を開発し、その手法の理論的な背景とインバージョン法との関係について議論をする。

## 3. 研究の方法

本研究では、「(1)モデリング誤差の検討」、「(2)震源インバージョンにおけるフィルターの意味についての考察」、「(3)非負の条件の検討」、「(4)データ統合方法の検討」、「(5)モデルの仮定の影響を受けにくい手法の検討」を行った。

(1) (2) (3)については、Yagi & Fukhata

(2011, GJI) によって開発された、グリーン関数の不確定性を考慮した波形インバージョンを発展させた手法を基に検討を行った。(4)については、問題を安定に解くために、グリーン関数の不確定性を厳密に取り扱うことなく、簡略化した共分散行列を用いてインバージョン法を用いた。(5)については、最近震源過程解析に用いられている Back-projection (BP) 法について検討を行った。

## 4. 研究成果

### (1) モデリング誤差の検討

震源近傍で観測される変位波形は、近地項、中間項、遠地項を含んでいる。それぞれの項のグリーン関数に含まれる誤差を評価しなければ、近地強震動における共分散行列を求めることはできない。そこで、各項に含まれる誤差をガウシアンで近似して、共分散行列を求め、数値実験を行い、解析を安定に求めることができるか確認を行った。

その結果、近地項と中間項を導入した場合、共分散行列の逆行列を安定に求めることが困難になり、結果として得られる解が安定しないことが明らかになった。

この問題に対処するために、時間領域ではなく周波数領域でインバージョンを行う方法を開発し、数値実験を行った。周波数領域で解析を行う場合は、共分散行列が対角行列になるために、インバージョン自体は安定に行うことができる。数値実験の結果、理想的な場合は、安定に解を得ることができることを確認できた一方で、誤差を含むデータの解析時には、モデルの自由度が高いため、適切な解を得ることができないことも明らかになった。

### (2) 震源インバージョンにおけるフィルターの意味についての考察

1980年代に震源過程を求めるための波形インバージョンが発案されて以降、多くの研究者が解析手法を開発している。現在は古典的な解析手法のプログラムソースが配布されており (例えば、Kikuchi and Kanamori, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI/>)、多くの地震にこれらの解析手法が適用されている。

多くの震源過程解析には、グリーン関数のモデリング誤差を軽減するため、もしくはノイズを除去するために、観測波形とグリーン関数にフィルターを適用する機会が多い。また、異なるデータでは、異なる周波数帯域のフィルターをかけて得られた機会が多い。そこで、データの統合を目指すために、まずは、異なる周波数のデータを解析する意味について考察した。

その結果、解析結果が採用したフィルターによって変化するという事実は、フィルターを適用した後の観測誤差が、平均ゼロの無相関のガウス分布で近似することと、拘束条件

の適用によって生じていることを明らかにした。結局のところ、誤差モデルの仮定によって得られる解のイメージが大きく変わることになる。また、フィルターで取り除かれた周波数帯域の震源像は、拘束条件によって定まることを考えると、適切な震源像を得るためには、できる限り広帯域の波を使用することが望ましいことを示した。

### (3) 非負の条件の検討

近年になって、L-BFGS-B法のような解の領域に制限をかけた上で、高速で最小二乗解が求められる手法が開発された。この手法を用いて、震源過程インバージョンによく用いられる非負の条件について検討を行った。解析には、2014年チリ地震を対象にし、データは、遠地実体波P波を用いた。

最小二乗解の場合の断層すべり速度の推定誤差(1)のほとんどは0.007~0.012 m/s程度であることを考慮して、断層すべり速度を、それぞれ -0.1、-0.025、-0.01、0 m/s以上の範囲に制限した場合の解を求めた。

一般に、実際の断層すべり速度が0の領域をモデル化して値を求めた場合、推定値は推定誤差によって0付近ではあるが正や負の値を持つ。この場合に非負の条件を課すと、正の値しか求まらないために、推定した値を積分した地震モーメントと最終的な断層すべり分布は歪められた値となる。実際に、非負の条件の解と最小二乗解とを比較すると、最大すべり量が半分程度となるが、地震モーメントは $2.0 \times 10^{21}$  Nmと倍近い値となることが分かった。一方で、両者の最終的なすべり量分布は大きく異なるが、断層すべりのスナップショットを比較すると、両者の特徴は一致し、それほど大きな差はない。

断層すべり速度を -0.01 m/s 以上の範囲、つまり推定誤差(1)と同等程度に制限すると最小二乗解の特徴は失われ、非負の条件の解とほぼ一致する。一方で、2以上の範囲に制限すると、最小二乗解の特徴を保持した結果が得られる。本来は、断層すべりが存在しない領域をモデル化することによって解が大きく変わるべきではないが、推定誤差の範囲を考慮して解の範囲を制限しない場合は、積分量として求まる値が歪められることになることになる。解の範囲を制限する場合は、推定誤差を考慮して制限範囲を定める必要があることが分かった。

### (4) ベイズインバージョンによるデータ統合

異なる種類のデータを統合する場合は、適切に各データの有する情報量を評価する必要がある。本研究では、ABICを用いて、各データの情報量を評価し、データ間の相対的な重みを求める手法を開発した。開発した手法を、1997年チベット地震に対して、適用してその効果は確認した。

1997年チベット地震の解析には、InSARの

データと、遠地実体波を用いた。この地震は横ずれ断層型である。横ずれ断層では、波の押し引きの極性が変化するノード付近に遠地実体波の観測点が位置するために、わずかな断層面のズレによってグリーン関数は大きく変化する。その一方で、InSARのデータは時間的な分解能はないものの、断層すべりの詳細な空間分布を求めることができる。

この解析で、断層面の設定に起因するグリーン関数の誤差が大きい場合においても、提案したデータの統合方法は上手く機能し、尤もらしい解を得ることができることが明らかになった。

### (5) モデルの仮定の影響を受けにくい手法の検討

BP法が震源過程解析に用いることができることが示され(Ishii, 2005, Nature)多くの研究者がBP法を用いて大地震を解析するようになってきている。BP法は、インバージョン解析のように、グリーン関数を計算することなく波の放出源の時空間分布を求めることができると考えられているが、その一方で、得られた解がどのような意味があるのかについては、明確な議論がなされていない。

一方で、本課題にて、モデル誤差の影響を軽減する解析手法について議論している際に、グリーン関数と観測波形の相互相関関数を計算し、震源に投影する解析手法が議論され、結果としてHybrid back-projection(HBP)法が開発された。HBP法を2011年東北地方太平洋沖地震に適用することにより、その有効性を示すことができた。

HBP法を足がかりに、理論的な検討を行うと、BP法はグリーン関数をデルタ関数と近似した場合のHBP法であること、HBP法の解はDamped Least-Squares Solutionのダンピングを大きくとった場合の解に相当することを示した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計14件)

Yagi, Y., Okuwaki, R., Enescu, B., Hirano, S., Yamagami, Y., Endo, S., & Komoro, T., 2014, Rupture process of the 2014 Iquique Chile earthquake in relation with the foreshock activity, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2014GL060274. 査読あり  
Okuwaki, R., Yagi, Y., Hirano, S., 2014, Relationship between High-frequency Radiation and Asperity Ruptures, Revealed by Hybrid Back-projection with a Non-planar Fault Model, *Scientific Reports*, doi:10.1038/srep07120. 査読あり  
Shimojyo, K., Enescu, B., Yagi, Y., & Takeda, T., 2014, Fluid-driven Seismicity

Activation in Northern Nagano Region After the 2011 M9.0 Tohoku-oki Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1002/2014GL061763. 査読あり  
八木勇治, 2014, 震源過程インバージョンに用いるフィルターの影響, *地震* 2, 66, 147-149, doi:10.4294/zisin.66.147. 査読あり  
Fukahata, Y., Yagi, Y., & Rivera, L., 2013, Theoretical relationship between back-projection imaging and classical linear inverse solutions, *Geophys. J. Int.*, 196, 552-559, doi: 10.1093/gji/ggt392. 査読あり  
Funning, G. J., Fukahata, Y., Yagi, Y., & Parsons, B., 2013, A method for the joint inversion of geodetic and seismic waveform data using ABIC: application to the 1997 Manyi, Tibet, earthquake, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1093/gji/ggt406. 査読あり  
Hashima, A., Fukahata, Y., Hashimoto, C., & Matsu'ura, M., 2014, Quasi-static strain and stress fields due to a moment tensor in elastic-viscoelastic layered half-space, *Pure Apply. Geophys.*, 171, 1669-1693, doi: 10.1007/s00024-013-0728-0. 査読あり  
Hamling, I. J., Wright, T. J., Calais, E., Lewi, E., & Fukahata, Y., 2014, InSAR observations of post-rifting deformation around the Dabbahu rift segment, Afar, Ethiopia, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1093/gji/ggu003. 査読あり  
Noda, A., Hashimoto, C., Fukahata, Y., & Matsu'ura, M., 2013, Interseismic GPS strain data inversion to estimate slip-deficit rates at plate interfaces: application to the Kanto region, central Japan, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1093/gji/ggs129. 査読あり  
Yagi, Y., Nakao, A., & Kasahara, A., 2012, Smooth and rapid slip near the Japan Trench during the 2011 Tohoku-oki earthquake revealed by a hybrid back-projection method, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 355, 94-101, doi: 10.1016/j.epsl.2012.08.018. 査読あり  
Yagi, Y., Nishimura, N., & Kasahara, A., 2012, Source process of the 12 May 2008 Wenchuan, China, earthquake determined by waveform inversion of teleseismic body waves with a data covariance matrix, *Earth Planets Space*, 64, e13-e16, doi: 10.5047/eps.2012.05.006. 査読あり  
Fukahata, Y., Yagi, Y., & Miyazaki, S., 2012, Constraints on early stage rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake from 1 Hz GPS data, *Earth Planets Space*, 64, 1093-1099, doi: 10.5047/eps.2012.09.007. 査読あり  
Duputel, Z., Rivera, L., Fukahata, Y., &

Kanamori, H., 2012, Uncertainty estimations for seismic source inversions, *Geophys. J. Int.*, 190 (2), 1243-1256, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05554.x. 査読あり  
深畑幸俊・八木勇治・三井雄太, 2012, 2011年東北地方太平洋沖地震による絶対歪みの解放:遠地実体波インバージョン解析と動的摩擦弱化, *地質学雑誌*, 118 (7), 396-409, doi: 10.5575/geosoc.2012.0040. 査読あり

〔学会発表〕(計 6件)

Fukahata, Y. & Yagi, Y., 2014, Use of ABIC and Invention of Inversion Methods, *AGU Fall Meeting*, サンフランシスコ, 2014年12月(招待講演)

Fukahata, Y., Yagi, Y., & Rivera, L., 2014, Theoretical background of back-projection imaging and its relation to time-reversal and inverse solutions, *EGU General Assembly*, ウィーン, 2014年4月~5月(招待講演)

八木勇治・深畑幸俊, 2014, 震源過程解析と非負の条件, 地震学会秋季大会, S08-P20, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟市), 2014年11月.

八木勇治・深畑幸俊, 2013, グリーン関数の不確定性を考慮した強震動震源インバージョン法, 地震学会秋季大会, A1-01, 神奈川県民ホール、産業貿易センター(横浜市), 2013年10月.

Yagi, Y., Nakao, A., & Kasahara, A., 2012, Seismic energy releases of great earthquakes revealed by a hybrid back-projection method, *AGU Fall Meeting*, S43H-04. (招待講演), サンフランシスコ, 2012年12月.

八木勇治, 2012, Hybrid back projection法による震源イメージング, 地震学会秋季大会, P1-56, 函館市民会館, 函館市民体育館(函館市), 2012年10月.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

八木 勇治 (YAGI, Yuji)  
筑波大学・生命環境系・准教授  
研究者番号: 50370713

### (2) 研究分担者

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