

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540487

研究課題名(和文)本震直後の余震活動の解明：地震波振幅を用いた震源とメカニズム解の同時推定

研究課題名(英文) Study on early aftershock sequences: Simultaneous estimation of hypocenter and focal mechanism using seismogram amplitude

研究代表者

小菅 正裕 (KOSUGA, Masahiro)

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：90142835

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円、(間接経費) 660,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、地震波の波形を用いて震源位置を推定する方法を開発し、特に本震直後の余震活動を明らかにすることを目的としている。2011年東北地方太平洋沖地震等については通常の方法での震源決定を行い、余震域が本震からの経過時間の対数に比例して広がったことを明らかにした。本研究で開発した方法は、ひな形(テンプレート)地震と連続波形の相関を用いて震源を推定するものである。この手法を東北地方太平洋沖地震へ適用したが、余震活動の全容解明には課題を残した。しかし、この手法の改善により、例えば地殻内の流体分布の解明などへの応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the characteristics of early aftershock sequences by developing a method to estimate earthquake hypocenter using waveforms. For the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, we determined hypocenters by an ordinary method and found that the aftershock area expanded with proportional to the logarithm of lapse time from the mainshock. The newly developed method uses correlation of waveforms and time difference between the template and continuous envelopes to estimate hypocenter. We applied the method to the aftershock sequence of the Tohoku Earthquake and found some problems to determine enough number of events. Though we need to improve the method, it is expected to be useful, for example, to know the geofluid distribution in the crust.

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：余震 震源 メカニズム解 相関 地震波形 テンプレート

1. 研究開始当初の背景

規模の大きな地震が発生すると、引き続いて余震が発生する。余震の活動様式は本震の破壊過程や本震周辺の応力場等の情報を含み、その知見は地震学的に極めて重要である。余震数は時間とともに指数関数的に急激に減少するため、本震直後の地震活動を把握することが特に必要である。しかし、本震直後は余震が頻発するために、前の地震の震動が収まらないうちに次の地震の震動が始まり、震源決定のデータとなる震動の開始時刻を正確に読み取ることが困難である。そのため、本震直後は観測の空白の時間帯となっている。近年、震動の開始時刻ではなく振幅を用いて震源位置を推定する試みが行われるようになった。地震波の最大振幅は地震が頻発した場合にも測定できるので、振幅を使って震源決定ができれば、これまで知られていなかった本震直後の余震活動を詳細に知ることができる。

2. 研究の目的

本研究では、地震波の波形を用いて震源位置と震源メカニズム解を同時決定する方法を開発する。その手法及び通常的手法による震源決定法を 2004 年新潟県中越地震等の余震観測データに適用し、以下のことを明らかにする。

- (1) 余震活動時系列の全容。時間的に一様な検知能力での震源決定により、余震活動の時系列的特徴を明らかにする。
- (2) 本震発生直後の余震分布。本震断層のすべり量の空間的不均質と余震数や余震規模がどのように対応するのかを明らかにする。
- (3) 本震発生直後の震源断層周辺の応力状態。本震直後の震源メカニズム解の空間分布から、本震発生直後の応力状態を推定する。
- (4) 震源位置と震源メカニズム解の時間変化とその原因。本震発生後には余効変動・断層のヒーリング・流体移動等により応力場が時間変化すると考えられる。震源分布とメカニズム解の空間分布の時間変化から、応力の再配分や流体移動が起こったのか、起こったとすればどのように起こったのかを推定する。

3. 研究の方法

研究開始当初は地震波の振幅値を用いて震源位置を推定することを考えていたが、先行研究の精査を行ったところ、震源が既知の地震の波形をひな形(テンプレート)として用い、テンプレートとの地震波形の相関を用いて震源を推定することが行われており、その方が推定精度が高いと考えられることがわかった。そこで、地震波のエンベロープをデータとして用いたテンプレート法の開発を行うこととした。

(1) エンベロープ波形の作成

バンドパスフィルターを通した地震波形の RMS 振幅を計算してエンベロープ波形を得

る。

(2) 初期震源推定

複数のテンプレートと連続波形のエンベロープの相関を計算し、最も相関の高いエンベロープの位置を初期震源位置とする。

(3) 震源位置の改善

グリッド・サーチ法により震源位置の決定を行う。すなわち、初期震源の周りに時空間的なグリッドを設定し、地震発生時刻、震源位置を少しずつ変えながら波形相関を計算し、相関が最も良い時刻と位置を選び出す。

(4) 震源メカニズム解の推定

相関が最も高いテンプレートは波形が最も良く似ていることを表すので、震源メカニズム解も同じと考えることができる。そのため、テンプレート地震のメカニズム解が既知であれば、メカニズム解が未知の地震の解を得ることができる。

(5) 本震発生直後の余震活動状況の解明

以上の方法を用いて、本震発生直後の余震とメカニズム解の空間分布、及びそれらの時間変化を明らかにし、本震発生直後の応力状態が時間とともにどのように変化し、その原因は何かについて検討する。

4. 研究成果

(1) 2004 年新潟県中越地震の余震域北端部で発生した M5.9 の地震の余震について、連続記録を基に 2 次余震の震源決定を行い、その時空間分布の特徴を検討した。決定した震源の深さ分布範囲は、本震からの経過時間の対数に比例して広がることになった。これは他地域で報告されている事例と共通する特徴である。また、震源分布域の拡大により、M5.9 の地震直後の時間帯での分布と直交するような分布が見えるようになった。このことは、余震分布から本震断層の大きさや向きに関する情報を得る上で、本震直後の震源分布を精度良く求めることが極めて重要であることを如実に示している。これは目的の(2)に対応する成果である。

(2) 研究開始直前に 2011 年東北地方太平洋沖地震が発生したので、この地震についても本震直後の余震の震源決定を精力的に行った。その結果、本震直後の余震分布の北端は 1994 年三陸はるか沖地震の地震時すべり域までは及ばず、1994 年のすべりによる歪エネルギーの放出が余震域の広がりを規定したと考えられる。しかし、余震域の北端の位置は時間が経過すると次第に北に伸び、(1)の場合と同様に、本震からの経過時間の対数に比例して広がったことが判明した。従って、余震域の大きさが本震からの経過時間の対数に比例して広がるという時間依存性は、東北地方太平洋沖地震という超巨大地震の場合も含んだ普遍的な現象であることが明らかになった。これも目的の(2)に対応する成果である。

(3)東北地方太平洋沖地震の2日前に発生したM7.3の地震の余震活動が東北地方太平洋沖地震の震源に向かうように移動したことは、日本海溝沿いの領域での地震活動を把握することの重要性を示している。しかし、海域においては震源決定精度が劣るという重要な問題があるので、震源とメカニズム解の推定に地震波形を利用することを検討した。具体的には、波形相関を用いた地震波形の分類と、変換波の性質の検討を行った。地震波形の分類には、フィルターを通した波形と包絡線(エンベロープ)波形の両方を用いたが、どちらでも妥当な分類を行うことができた。また、いずれの方法でも、Pコーダ波部分に変換波が含まれる地震群を1つのグループとして分類することができた。変換波については、宮城県沖の深さ30~60kmの地震のエンベロープ波形を用いて詳細な検討を行った。この位相の振動特性や見かけ速度から、変換波は観測点にP波として到達したものであることがわかり、変換波をP波と見なした震源決定により、地表または海底面で反射したsP波であることが判明した。sP波は海域での震源決定精度向上に有効であることが先行研究によって示されている。sP波をメカニズム解の決定精度向上に利用する上での課題を整理した。これも目的の(2)に対応する成果と、目的の(1)を得るための手法開発である。

(4)震源が既知の地震の波形(テンプレート波形)との相関を基に地震の検出を行う方法の一つとして、地震波形のエンベロープを使う方法の開発を行った。方法の概略は以下の通りである。連続波形のエンベロープを計算する。テンプレートの地震を選択し、エンベロープを計算する。観測点ごとに連続波形とテンプレートの相互相関を計算し、相関係数の時系列を得る。観測点平均した相関係数の時系列を計算し、相関係数が高い順に地震を検出する。同じ地震を複数回抽出しないように、前後一定の時間を除いた後、相関係数が最大となる時刻とテンプレートを抽出する。この手続きを、抽出した最大相関係数の値がしきい値を下回るまで行う。これで、地震の発生時刻とテンプレートの組を決めることができる。検出した地震とテンプレートの走時差を使って相対震源決定を行う。検出した地震のマグニチュードを決定する。

相対震源決定の手続きは以下の通りである。候補テンプレートを複数抜き出す。

連続波形とテンプレート波形のラグ相関を計算し、ラグを求める。テンプレートの震源位置の周りに設定した3次元のグリッドに対し、で求めたラグとの相対走時差の2乗和を求める。この計算を地震発生時刻の初期値を少しずつ変えながら行い、相対走時差の2乗和が最小となる時刻を地震発生時刻、その時のグリッド位置を震源と見なす。

以上の手続きを全候補テンプレートに対

して行い、相対走時差の2乗和が最小となるテンプレートからの結果を採用する。これは目的の(1)を得るための手法開発である。

(5)(4)の手法を用いて、東北地方太平洋沖の広範な領域を対象として地震の検出と震源推定を行った。波形データはHi-net観測点の連続記録及びイベント記録を用い、周波数帯域は2~16Hzとやや広めに取った。観測点は青森県から千葉県までの主に太平洋側の46点とし、観測点間隔が比較的一様になるように選んだ。テンプレートは空間的に一様になるように186地震を使用し、テンプレート長は、P波到着からの40秒とした。地震検出の相関係数のしきい値は0.4とした。地震がそれほど頻発していない時間帯に対しての適用では、気象庁一元化震源よりも多くの地震を検出することができ、本研究で開発した手法の有効性が確かめられた。しかし、東北地方太平洋沖地震の本震直後の時間帯では、特に宮城県沖から茨城県沖にかけての領域において、逆の結果が得られ、手法をさらに改善する必要があることが判明した。興味深いこととして、海溝沿いでは多くの地震が検出されたことが挙げられる。(3)で述べたように海溝沿いの地震検出はこれまでの課題であったので、その解決に向けての前進ができたと考えられる。これは目的の(1)(2)に対応する成果であるが、余震活動時系列の全容までは得ることができなかった。

(6)東北地方太平洋沖地震後に秋田県北部の森吉山付近で発生した誘発地震について、臨時地震観測データも含めて震源決定を行い、震源の移動の様子を明らかにした。この地震群ではS波の後に顕著な後続波が観測されており、地殻中の散乱波と考えると散乱源の位置を推定した。散乱を起こしているのは地殻内の流体である可能性がある。これは目的の(4)に対応する成果である。

震源が同じ地震からの散乱波の波形の時間変化があれば、流体移動によるのが最も合理的である。そのためには、震源が未知の地震も含めて、震源が同じ地震を多数抽出する必要がある。本研究で開発した手法はそのための手段として用いることができる。これは、今後の研究の発展の方向を示している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2件)

Masahiro Kosuga, Kazutoshi Watanabe, Seismic activity around the northern neighbor of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake with emphasis on a potentially large aftershock in the area, Earth Planets Space, 査読有、Vol. 63、2011、pp. 719-723

DOI: 10.5047/eps.2011.06.006
Masahiro Kosuga, Seismic activity near the Moriyoshi-zan volcano in the Akita Prefecture, northeastern Japan: Implications for geofluid migration and a midcrustal geofluid reservoir, Earth Planets Space、査読有、投稿中

〔学会発表〕(計 8件)

小菅 正裕、2004年新潟県中越地震震源域北端部で発生したM5.9の地震直後の2次余震の震源分布、日本地震学会秋季大会、2011年10月12日、静岡市

Masahiro Kosuga, Kazutoshi Watanabe, Aftershock and induced seismic activity of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake in the northern part of Tohoku district, NE Japan, 2011年12月9日, Fall Meeting of the American Geophysical Union, San Francisco (USA)

千葉 正亮、小菅 正裕、2011年東北地方太平洋沖地震と2004年新潟県中越地震の本震直後の余震活動と余震域の拡大、日本地球惑星科学連合2012年度大会、2012年5月24日、千葉市

千葉 正亮、小菅 正裕、エンベロープ波形のテンプレートを用いた本震直後の余震の検知、日本地震学会秋季大会、2012年10月19日、函館市

小菅 正裕、千葉 正亮、エンベロープのテンプレートを用いた本震直後の余震の検知、日本地球惑星科学連合2013年度大会、2013年5月22日、千葉市

Masahiro Kosuga, Masaaki Chiba, Location of immediate aftershocks using seismogram envelopes as templates, Joint Assembly of IAHS, IAPSO, and IASPEI, 2013年7月23日, Gothenburg (Sweden)

Masahiro Kosuga, Location of early aftershocks of the 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake (M = 6.8) in central Japan using seismogram envelopes as templates, Fall Meeting of the American Geophysical Union, 2013年12月9日, San Francisco (USA)

小菅 正裕、境 優佳、2011年東北地方太平洋沖地震の本震直後の地震活動：エンベロープを用いた地震の検出と震源決定、日本地球惑星科学連合2014年度大会、2014年5月1日、横浜市

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：

権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小菅 正裕 (KOSUGA, Masahiro)
弘前大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：90142835

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：