

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540451

研究課題名(和文) 稠密地震観測データの地震波干渉法解析による地殻構造の高分解能イメージング手法開発

研究課題名(英文) Development of high-resolution crustal structure imaging method using seismic interferometry of dense seismic array data

研究代表者

藏下 英司 (KURASHIMO, Eiji)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：00302620

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)：制御震源・自然地震の稠密地震観測データを用いて地殻構造を高分解能で明らかにするための手法開発を行い、東北地方南東部などで取得されているデータに適応した、稠密地震観測データに改良した地震波干渉法解析を適応することで、島弧モホ面の形状など、地殻全体の構造を高分解能で明らかにする事ができた。このことは、本研究で開発した解析手法が、地殻構造を高分解能で把握するのに有効であることを示している。

研究成果の概要(英文)：I developed a seismic array analysis method, using dense active and passive seismic data, to obtain high-resolution crustal image. By applying the improved seismic interferometry to dense seismic array data obtained in the southeastern part of NE Japan, high-resolution whole crustal image, including the geometry of Moho, was obtained. These results show that my new seismic array analysis method is a powerful technique to obtain high-resolution crustal image.

研究分野：地震学

キーワード：地震波干渉法 地殻構造 稠密地震観測データ

1. 研究開始当初の背景

日本列島の形成過程を明らかにする為には、地殻構造を高分解能で把握する事が重要である。現在の島弧地殻はマントル物質の貫入や付加による影響も受けていると考えられており、形成過程を理解する為には、地殻深部や上部マントル構造も出来るだけ高分解能で明らかにすることが重要である。近年、日本の様々な地域で制御震源を用いた反射法地震探査が行われ、地殻内部の不均質構造に関する知見が得られつつある。しかし、特に、島弧の中下部地殻・最上部マントルといった深部の構造に関しては、常に十分なイメージングが得られているとは限らない。一方、自然地震の観測データを利用し、レシーバー関数解析や地震波干渉法解析を適応することで、島弧の中下部地殻・最上部マントルといった深部の構造に関する知見が得られるようになってきた(例えば、Shiomi et al., 2008)。得られる構造の分解能を高くする為には、解析に使用する地震波形データの空間密度が大きい、すなわち、出来るだけ多点高密度に設置した観測点で得たデータを解析に使用することが必要である。しかし、日本列島に整備されている定常観測網の観測点間隔は 20 - 30km であり、それらで得られるデータだけの解析では、制御震源探査データで得られる空間分解能に到底及ばない。しかし、近年の独立型レコーダの機能向上により、制御震源構造探査時に、長期間の収録が可能で独立型レコーダを密な観測点間隔で長期間設置することが可能になったため、稠密自然地震観測データの取得も可能になった。地震波干渉法は、2 か所で同時観測された地震波形に相互相関処理を行うことで、一方を仮想的な震源、他方を仮想的な受振点とした場合の波形を合成することができる手法(Wapenaar et al., 2006)である。この手法を稠密自然地震データに適応することで、解析に使用する地震波形データの空間密度を飛躍的に上げることが可能になる。自然地震データに対して地震波干渉法解析を適応することで作成した合成波形データや制御震源データを用いて地殻構造のイメージングを行なう場合、解析対象地域下の地震波速度構造を精度よく把握することが重要である。また、観測される自然地震の波形には、震源と観測点の位置関係・各地震のメカニズム解の影響を受けている為、自然地震データを用いる場合には、このような違いも考慮することも必要である。すなわち、震源位置・メカニズム解と探査地域下の地震波速度構造モデルを効率よく得る手法の確立が、地殻構造を高分解能でイメージングするために必要である。

2. 研究の目的

近年取得した制御震源・自然地震の稠密地震観測データを用い、地殻構造を高分解能で把握するために必要となる高精度な震源位

置、メカニズム解と高分解能地震波速度構造モデルを効率よく得る手法の確立を行なう。自然地震データに対して、各地震のメカニズム解を考慮した地震波干渉法解析を適応することで作成した合成波形データや制御震源データを用いて地殻・最上部マントル構造をイメージングする手法の確立を行なう。

3. 研究の方法

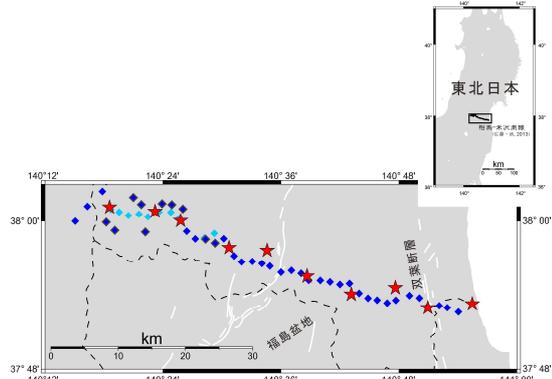


図1: 稠密地震観測の測線図
 ● (2012.8-2012.12)
 ★ (2012.8-2012.10)
 ◆ (2012.10-2012.12)

制御震源・自然地震の稠密地震観測データを用いて地殻構造を高分解能で明らかにするための手法開発を、平成 24 年度に東北地方南東部で実施された稠密地震観測「相馬米沢測線」(佐藤・他, 2013)で取得された稠密地震観測データを使用して実施した。稠密地震観測は、福島県相馬郡新地町から山形県高島町に至る測線長が約 70km の「相馬米沢測線」で実施された(図 1)。「相馬米沢測線」上には、1.0 Hz 速度型地震計(Lennartz Electric LE-3D lite)とオフラインレコーダが 40 箇所を設置され、2012 年 8 月 16 日から 2014 年 12 月 24 日まで連続収録を行っている。また、観測期間中には、「相馬米沢測線」上で制御震源地殻構造探査が実施され、稠密地震観測上の 10 箇所バイブレータの集中発震が実施されている(図 1)。これら 40 箇所の観測点では、自然地震に加えて、バイブレータ震源からの信号も収録されている。

探査測線下の地震波速度構造を得る為には、P 波・S 波の初動走時データが必要である。地震波速度構造解析を実施するにあたって、制御震源データだけでは、観測された初動の震央距離が短いため、地殻深部を通過する波線の観測データが無く、地殻深部の地震波速度構造を得ることが出来ない。そこで、地殻深部を通過する波線の観測データを得る為に、測線上の 10 箇所実施されたバイブレータの集中発震と測線近傍の地殻内や沈み込むプレートで発生した自然地震を、測線上の稠密観測点で観測したデータと測線近傍に設置されている既存定常観測網のデータから抽出するデータ編集作業を実施した。研究対象地域(緯度 37.2° - 38.5° N : 経度 139.6° - 141.3° E)では、気象庁一元化震

源カタログによると、観測期間中に2,956個の震源が決定されている。これら自然地震とバイブレータの発震時刻に従って、連続記録からイベント毎へのデータ編集作業を実施した。その後、臨時観測点の波形データと測線周辺の40点の定常観測点で得られている波形データとの統合作業を行った。このように作成したイベントデータから、測線近傍で発生した200個の自然地震を抽出し、P波・S波の手動検測を行なうことで、自然地震データのP波・S波の初動走時データを作成した。また、臨時観測点と定常観測点で取得したバイブレータの集中発震点データに対しては、発震点毎に垂直重合処理、震源波形との相関処理を行った。これらデータに対してP波初動の検測作業を行い、バイブレータ震源のP波初動走時データの作成を行った。これら走時データのうち、自然地震波形データから読み取った検測値からは、読み取り観測点数が、P相が5個以上、S相が1個以上ある地震の走時データを抽出し、バイブレータの集中発震点データからの検測値と合わせて地震波トモグラフィ解析を実施した。トモグラフィ解析には、プログラム simul2000 (Thurber and Eberhart-Phillips, 1999) を使用し、3次元速度構造の推定と震源再決定を行った。解析を行う際には、調査地域にX-Y-Z座標系を設定し、その領域内に格子を3次元的に作成した。設定した座標系のX軸は、「相馬 米沢測線」に沿った方向とし、格子点は、アレイ測線内ではX方向を7.5km間隔、Y方向を20km間隔に設定した。また、Z方向には、-1, 0, 2, 5, 10, 20, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150, 200kmのそれぞれに設定した。トモグラフィ解析の初期モデルには、連携震源決定法 (Kissling et al., 1994) を用いて計算した1次元速度構造モデルを使用した。

自然地震観測データを用いた地震波干渉法解析を実施するにあたり、観測期間内に「相馬 米沢測線」下の $-10\text{km} < X < 65\text{km}$, $Y \pm 5\text{km}$ の範囲内にトモグラフィ解析によって再決定された地震の抽出作業を行った。また、各観測点で観測された地震波形の振幅を評価するために、トモグラフィ解析によって得られた3次元速度構造を使用して、抽出した自然地震の波形データから読み取ったP波初動振動方向のデータを用いてメカニズム解析を実施した。メカニズム解析にはHASH (Hardebeck & Shearer, 2002) を使用し、各地震のメカニズム解を得た。イベントデータの各受振点記録間の相互相関処理を実施する際には、得られたメカニズム解の結果をもとにして、各観測点で観測された初動振幅値に重みをつけ、節面に近い観測点での初動振幅値に対する重みを小さくした後に、各受振点記録間の相互相関処理を行なうことで、全ての観測点を仮想発震点・仮想受振点とする稠密合成波形データを作成した。得られた稠密合成波形データに共通反射点重合法による反射法解析を実施し、「相馬 米沢測線」

下の断面図を得た。NMO補正・マイグレーション処理、深度変換処理の際に必要な速度構造は、トモグラフィ解析によって得たP波速度構造をもとにして作成した。

探査地域下の高分解能なイメージングを得る方法の1つとして散乱法解析 (例えば、Kurashimo et al., 2015) がある。そこで、「相馬 米沢測線」上で取得されたバイブレータの集中発震データに散乱法解析を適応した。散乱法解析は、地震波のコーダ部分がすべて散乱体からの一次等方散乱であると仮定し、探査測線下に0.2km間隔で作成した格子点からの散乱波に着目して実施した。一次等方散乱の仮定により、設定した格子点近傍に散乱源がある場合、散乱源から発生した散乱波が各観測点で観測される。そこで1回の発震データにおいて1つの格子点に着目し、発震点から格子点、格子点から全ての観測点までの地震波の走時を計算し、センブルス解析 (Neidell and Taner, 1971) を実施することで、格子点近傍で散乱した散乱波の検出を試みた。バイブレータ震源から生成される地震波はP波であり、散乱はP波からP波 (PP散乱) を仮定した。散乱波の走時計算には、トモグラフィ解析によって得られたP波速度構造を使用して実施した。このような計算を、全ての発震において、全ての格子点と観測点の組み合わせで実施した後に、各格子点でのセンブルス値の平均値を求めることで散乱体分布を推定した。

4. 研究成果

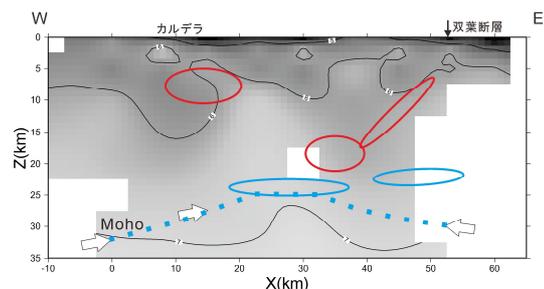


図2: 「相馬-米沢測線」下のP波速度構造と反射イベント・散乱体分布。青色破線と楕円は、地震波干渉法解析より得られた断面図で確認できる反射イベント、赤色楕円は、散乱法解析によって得られた強散乱領域を示す。

図2に、トモグラフィ解析により得られた「相馬 米沢測線」下のP波速度構造に地震波干渉法による解析結果から確認できる反射イベント、散乱法解析で得られた強散乱領域を重ねた図を示す。P波速度構造からは、測線東部に位置する双葉断層の深部延長上や測線西部に位置するカルデラの下では、低速度領域が確認できる。地震波干渉法による解析結果から確認できる深さ25-30km付近に凸状の反射イベントをP波速度構造と比較すると、反射イベントの深さが浅くなっている領域は、高速度領域が盛り上がっている領域と対応している。P波速度の値から、この反射イベントは、Moho面と解釈することができ、測線中央部は中絶リフト帯に位置していることから、リフト帯における地殻の薄化を示

していると考えられる。測線中央部における下部地殻のP波速度が周囲に比べて高速になっているのは、リフト活動に伴うマグマの貫入が原因であると考えられる。また、測線東部に位置する双葉断層の深部延長上や測線西部に位置するカルデラの下では、強散乱領域が確認できる。これらは、双葉断層の深さ約15kmまでの形状や、カルデラ下の不均質構造に関する知見を示しており、本解析手法により、地殻全体の構造を高分解能で把握する事ができた。これらの結果は、地殻の形成過程を考える上で重要な地震学的拘束条件となる。

また、本解析手法を、2014年に長野県北部で発生した地震の余震観測データに対しても適用した。地震波トモグラフィ解析を実施することで余震域における詳細な地震波速度構造を求め、メカニズム解析の結果を考慮した各受振点記録間の相互相関処理を行なうことで、全ての観測点を仮想発震点・仮想受振点とする稠密合成波形データを作成した。得られた稠密合成波形データに共通反射点重合法による反射法解析を実施し、反射法断面図を得た。NMO補正・マイグレーション処理、深度変換処理の際に必要な速度構造は、トモグラフィ解析によって得たP波速度構造をもとにして作成した。得られた反射法断面図から、地殻内の深さ5km付近に存在する反射イベントに関する知見を得ることが出来た。これらのことは、本研究で開発した解析手法が、地殻構造を高分解能で把握するのに有効であることを示している。

今後は、本研究で開発した解析手法を、日本の他の地域で得られている稠密地震観測データに適用し、地殻・上部マントル構造を高分解能でイメージングを行なう。得られた日本列島の様々な地域におけるイメージング結果の比較から、日本列島下における地殻・上部マントルの地域性を明らかにし、日本列島の形成過程を考察する上で重要な新しい地震学的拘束条件を得ることが期待できる。

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)

[学会発表](計 3 件)

蔵下英司, 稠密地震観測による東北地方南東部下の地殻構造, 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年4月30日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

Eiji Kurashimo, Seismic crustal structure beneath the southeastern part of northeast Japan by dense seismic array observation, 16TH SEISMIX International Symposium, 2014年10月12日, Barcelona (Spain)

Eiji Kurashimo, Aftershock distribution and heterogeneous structure in and around the source area of the 2014 northern Nagano Prefecture earthquake (Mw 6.2), central Japan, revealed by dense seismic array observation, 2015 AGU Fall meeting, 2015年12月14日, San Francisco (USA)

[その他]

ホームページ等

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/STAFF2/ekura.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蔵下 英司 (KURASHIMO EIJI)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号: 00302620