

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654141

研究課題名(和文)地球潮汐と地震波干渉法を利用した地殻浅部地震波速度の応力依存性に関する研究

研究課題名(英文)A study on stress sensitivity of seismic velocity at shallow media using the earth tide and seismic wave interferometry

研究代表者

西村 太志(Nishimura, Takeshi)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40222187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：浅部地盤の地震波速度が応力(歪み)によってどの程度変化するかを調べるために、ほぼ半日周期で地球を膨張・収縮させる地球潮汐を利用した。膨張時期と収縮時期に2観測点間を伝播する地震波を常時微動の相互(自己)相関関数解析から抽出し、両時期の比較から地震波速度の変化を求めた。岩手山麓の小アレー地震観測のデータを解析した結果、周波数帯1-2Hzにおいて、収縮時期に対して膨張時期の地盤の地震波速度は $0.18 \pm 0.05\%$ 減少すること、速度変化の歪み感度は 7×10^{-6} /strainであることが明らかとなった。また、東北地方のHi-net観測点の2-4Hz帯のデータからほぼ同様の歪み感度が求められた。

研究成果の概要(英文)：We used the tidal effect acting on the solid earth by the moon to examine the strain sensitivity of seismic velocity at shallow structure. We retrieved seismic waves propagating between two sites by cross-correlating the ambient noises for the dilatational and contractional episodes of the earth tide, respectively. Travel time differences of the seismic waves for the two episodes are measured for the ambient noises recorded at a small seismic array deployed on the foot of Mt. Iwate and Hi-net data. The results show that the seismic velocity at the dilatational episode is slightly lower than that at the contractional one. The strain sensitivity is estimated to be about $2-7 \times 10^{-6}$ /strain.

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：地球潮汐 地震波速度 歪み感度 地震波干渉法

1. 研究開始当初の背景

応力荷重による地殻構造の変化は、大地震や火山活動に伴う地震波速度変化の要因の一つとして考えられている。しかし、その基礎となるデータは、荷重を与えた岩石サンプルに数kHzの弾性波速度を入力して測定するという室内実験の結果が一般的に参照される。しかし、これは、自然界の一般的な地震波(数十Hz以下)に比べて非常に高周波を対象としたものであり、また、数十cm程度の試料の岩石サンプルには地殻浅部に存在する数mを超えるサイズのクラックによる影響は必然的に除去されているなど、必ずしも地殻構造に直接適用できない可能性がある。これを解決する方法として、1974年にReasenberg and Akiによる先駆的な論文が報告されている。彼らは、地球潮汐により地殻浅部の歪みが約 10^{-7} ~ 10^{-8} 変化することを利用し、小規模なエアガンによる人工震源を用いて地表極浅部の地震波速度の応力依存性を明らかにした。しかしながら、高額な実験費用の調達、実験地域の制限など問題点が多く、地震波速度の応力依存性の系統的な調査は現在行われていない。

2. 研究の目的

本研究では、雑微動の相互相関関数から2観測点間のグリーン関数を抽出する地震波干渉法と、地球潮汐により地殻浅部にかかる応力を利用し、地震波速度の応力変化率を測定する。これまでの室内実験や地震による応力解放時の変化率の測定結果をもとにすると、地球潮汐による地震波速度の変化量はおよそ最大0.1%程度であり、地震や火山活動等により生じる変化量より1桁小さく、検出限界程度しかない。そこで、対象地域に地震計小アレーを展開し、雑微動源の分布を考慮した地震波干渉法の解析を行うことで今までにない微小な変化量の検知を試みる。

3. 研究の方法

本研究は、地震計小アレーと孔井地震計からなる雑微動の観測とそのデータ解析、および地球潮汐の計算・応力場解析をもとに、地震波干渉法解析を行う。具体的には、地表の地震計小アレーの観測とデータ解析から、雑微動源の到来方向・伝播速度を測定する。

- ・歪み・傾斜データ解析から地球潮汐以外のノイズが含まれない期間のデータ選択、および理論計算の信頼性および精度を確認する。
- ・上記2つの解析結果をもとに、孔井と地表設置の地震計で記録される雑微動について、地球潮汐による応力量の違う期間ごと(約12時間毎の膨脹・収縮期)に相互相関関数を計算し、2観測点間の地震波速度変化量を測定する。

4. 研究成果

本研究は、岩手山東麓に臨時に設置した小アレー観測点のデータと防災科学技術研究所のHi-net地震観測点のデータについて、地震波干渉法を適用し、地球潮汐による速度変化量を推定した。

小アレーは、岩手山東麓のキャンプ場内に6台の短周期地震計(2Hz)と1台の3成分短周期地震計(2Hz)を設置した。まず、約200mの辺からなるほぼ正三角形の位置に3台の地震計を設置し、続いて、それぞれの辺の中央に地震計を設置した。最後に、中央に設置し、到来方向や見かけ速度の測定に偏りが無い配置とした。データロガー(近計、EDR-X7000)3台を用いて地動信号を1kHzのサンプリング周波数で記録した。また、GPS信号により、それぞれのロガーの内部時計の時刻校正を数時間おきに行った。観測は、2012年11月から2013年3月までの、約4ヶ月間実施した。解析には、安定して記録できた12月1日から2月26日のデータを利用した。

地球潮汐による体積歪量は、GOTIC2により理論的に計算した。観測点の座標をもとに、地表地点での値を採用した。なお、小アレー観測点の東0.5kmには、東北大学地震・噴火予知研究観測センターの焼走火山観測点がある。この観測点の孔井ひずみ計と計算値を比較した結果、位相がよく一致することを確認した。また、小アレーの観測期間中の膨脹時と収縮時の発現頻度を調べた結果、昼夜で偏りがあることがわかった。そこで、発生頻度がほぼ等しい2時から4時のデータのみを解析に用いた。

雑微動の相互相関関数は次のようにして計算した。まず、理論潮汐の計算値をもとに、5 nano strain以上の歪みのときを膨脹時、-5 nano strain以下の時を収縮時とした。それぞれの期間で、1分間ごとに記録されている雑微動信号データを分類し、アレー観測では7つの観測点から2観測点を選びだし、21の相互相関関数(CCF)を計算した。これらのCCFを収縮時、膨脹時ごとに重合し、相互相関関数を求めた。Hi-net観測点は、数十キロメートル間隔で設置されていることから、相互相関関数ではなく、自己相関関数(ACF)を膨脹時と収縮時ごとに計算した。なお、地震動などの大振幅の振動などは含まないデータを解析した。また、相互相関関数の計算に当たって、1-2Hzあるいは2-4Hzのバンドパスフィル他をかけた波形を2値化した。自己相関関数の計算は、1-2, 2-4, 4-8Hzのバンドパスフィルターをかけて行った。

速度変化量は膨脹時のCCF(ACF)と収縮時のCCF(ACF)の波形の到達時間差から計算する。位相差の測定には、1秒ほどの時間窓をラグタイムに沿って移動させながら、それぞれの時

間窓における相互相関関数から両CCF (ACF) の時間差を求める。周辺構造を均質構造と仮定し、 $dv/v = -dt/t$ (v は速度、 t はラグタイム) の関係式から推定する。なお、時間差の測定は、小アレーのデータについてはラグタイム ± 3 秒内、Hinetのデータについては ± 1 秒に設定した。

小アレーについては、1-2Hzで21ペアの観測点から測定された速度変化率は、収縮時に対する膨張時に対して、 $-0.1 \sim -0.3\%$ と推定され、その平均値は -0.19% 、標準偏差は 0.06% と求められた。この速度変化量と潮汐の歪み変化量から、小アレー付近の地盤の速度歪み感度は 7.3×10^4 /strainとなった。ただし、全日分の雑微動データを選択して同様の解析を行うと速度変化率は数倍大きく求まる。

東北地方に位置するHi-net観測点116点において、2011年から2012年の2年間の雑微動のACFを解析した。その結果、2-4Hzの帯域では、Hi-netの多くの観測点で、地球潮汐によると考えられる地震波速度変化が検出された。収縮時に対する膨張時のACFの速度変化率は $-0.046 \pm 0.008\%$ と推定された。ただし、1-2Hz、4-8Hzについては、潮汐の効果と整合的な速度変化率が必ずしも多くの観測点では得られなかった。

岩手山小アレーを利用して、雑微動の波形特性を周波数 - 波数 (FK) 解析により調べた。その結果、強度の大きいスペクトルは幅広い波数空間で求められ、雑微動源は幅広い方位に分布している可能性があることがわかった。またFKスペクトルから推定される見かけ速度から、解析した雑微動には、実体波が十分含まれ、表面波と混在していると推察された。

以上の結果をもとに、求められた速度変化率について考察を行った。本研究で推定された速度の歪み感度は、これまでに人工地震源を利用して調べられた地盤浅部の歪み感度とほぼ一致している。人工地震源の場合は数十Hzや数千Hz以上の高周波である一方、本研究は1Hz程度の地震波を利用しており、歪み感度に顕著な周波数依存は認められなかったと言える。求められた速度変化率は、小アレー、Hi-netともに1-3秒以内の短いラグタイムのCCF(ACF)の波形のみから得られ、それより後ろのコーダ波からは潮汐応答と矛盾しない結果は得られなかった。これは次のように解釈できる。いま、雑微動が表面波に卓越し、求められたCCFのコーダ波も表面波を多く含んでいるとする。表面波は、潮汐による応力変化の影響を受けやすい浅部構造の影響を強く受ける。従って、コーダ波にも位相差変化が見られることが期待される。しかしながら、観測データは、短いラグタイムの時の

みに位相差変化が見られ、コーダ波には見られない。これはCCFのコーダ波は、表面波成分があまり卓越していないことを強く示唆する。小アレーのFK解析では、雑微動には実体波成分が十分含まれることを示しており、CCFのコーダ波は地下深部から入射した散乱波や反射波から構成されていると考えられる。最後に、小アレー観測点では、1-2Hzに潮汐による効果が認められたのに対し、Hi-net観測では2-4Hzのみに認められた。この原因は現段階ではわからないが、小アレーの地震計は地表設置であるのに対し、Hi-netの地震計は100m以深の孔井に設置されており、観測点の深さの違いが雑微動を構成する波動場やそれらの周波数特性の違いとなり、結果に影響を与えているのかもしれない。これについては、鉛直方向の小アレーの解析を新たに行うなど、別の観測データを得ることによって明らかになると考えられる。

以上、本研究は、雑微動の相互相関解析によって、数Hz帯の地球潮汐による地震波速度変化が検出できることをはじめて実証した。この方法を用いることにより、多くの場所で地盤浅部における応力変化と地震波速度変化の関係性を定量的に議論できる。

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)

[雑誌論文](計 0件)

[学会発表](計 3件)

Tomoya Takano, Takeshi Nishimura, Hisashi Nakahara, Yusaku Ohta, and Sachiko Tanaka, Detecting temporal changes of seismic velocity in response to tidal strain: analysis of a small array data at Iwate volcano, AGU 2013 fall meeting, 2013年12月12日, サンフランシスコ (米国).

高野 智也・西村 太志・中原 恒・太田 雄策・田中 佐千子, 地震波干渉法に基づく地球潮汐による地震波速度変化の検出 - 岩手山東麓における小アレーデータの解析, 日本地震学会2013年秋季大会, 2013年10月8日, 横浜市.

高野 智也・西村 太志・中原 恒・太田 雄策・田中 佐千子, 雑微動の自己相関解析にもとづく地球潮汐による地震波速度変化の検出の試み, 日本惑星科学連合2013年大会, 2013年5月20日, 千葉市.

〔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

西村 太志 (NISHIMURA, Takeshi)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：40222187

(2)研究分担者

田中 佐千子 (TANAKA, Sachiko)
独立行政法人防災科学技術研究所・
観測・予測研究領域 地震・火山防災研究
ユニット・研究員
研究者番号：30551535

(3)連携研究者

太田 雄策 (OHTA, Yusaku)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：20302078

(4)連携研究者

中原 恒 (NAKAHARA, Hisashi)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：20302078