

令和元年6月5日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17788

研究課題名(和文)地震学的データの複合解析による地震波速度時間変化の深さ分布と回復過程

研究課題名(英文) Depth distribution and recovery process of seismic velocity change by combined analysis of seismological data

研究代表者

高木 涼太 (Takagi, Ryota)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：10735963

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：地球内部の地震波速度構造は、大地震に伴う強震動や断層すべりによる歪み変化により、地震前後で変化する。また、地震時に変化した地震波速度は地震後に徐々に元の状態に回復すると考えられる。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地震波速度変化と2018年北海道胆振東部地震に伴う地震波速度変化や地下構造変化を検出し、その深さ分布に示唆を与えることができた。また、観測される波動場の解明を通して、地下構造モニタリング手法の高度化に資することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震波速度は地球内部状態によって変化するため、地震波速度の時間変化を推定することで地球内部状態をモニタリングできる。本研究では大地震に伴う地震波速度変化とその回復過程についての理解を深めるとともに、地震波形データを用いた地震波速度変化推定手法の高度化の可能性を示した。地震波速度変化のメカニズムの解明、および、地震波形データを用いた地球内部状態のモニタリングに向けて、本研究により基礎的な情報を与えることができた。

研究成果の概要(英文)：The seismic velocity structure inside the earth changes before and after large earthquakes due to strain changes caused by strong motions and fault slips. It is considered that the seismic wave velocity changed during the earthquakes gradually recovers to the original state after the earthquakes. In this study, I detected the seismic velocity change associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake and the seismic velocity change and the underground structural change associated with the 2018 Hokkaido Eastern Iburu earthquake, and suggested their depth distribution. In addition, I contributed to the advancement of subsurface structure monitoring through the elucidation of the observed seismic wave field.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：地震波干渉法 地震波速度変化 常時微動 2011年東北地方太平洋沖地震 2018年北海道胆振東部地震

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年の地震学的データの品・量の向上とデータ解析手法の発展により、これまではある時間、あるいは、ある期間平均のスナップショットとして推定されていた地下構造の時間変化が捉えられるようになった。地震波速度の時間変化は、岩石中の微小クラックの密度・形状・流体飽和などのミクロスケールの状態変化を反映していると考えられるが、観測される地震波速度変化のメカニズムは未解明な部分が多い。また、地震波速度時間変化の要因とそのメカニズムを解明できれば、地震波速度を地殻内の応力計として利用した応力状態モニタリングの可能性を示すことができる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、地震学的観測データの複合解析に基づき、大地震に伴う地殻内の地震波速度時間変化の深さ分布とその回復過程を明らかにし、地震波速度時間変化の要因を解明することである。2011年東北地方太平洋沖地震は、地震時に $10^{-5}$ という非常に大きなひずみを地殻に与え、その余効変動は現在も継続している。また、地震時の強震動は、動的に大きな応力変化をもたらした。このように大きな擾乱が与えられたときの地殻の応答を地震波速度時間変化として詳細に理解し、その要因とメカニズムを解明することは、地震波速度時間変化を地殻内に埋め込んだ応力計として利用した地殻状態の監視に繋がる非常に重要な情報となり得る。

### 3. 研究の方法

大地震に伴う地震波速度時間変化の深さ分布を明らかにするために、深さ感度の異なる複数の手法やデータを組み合わせる複合的にアプローチする。特に、地震波干渉法と呼ばれる手法を常時微動や自然地震データに適用することで、受動的なデータから地震波速度変化を検出する。解析には長期間データを使用して地震波速度の時間変化を推定し、深さによる回復過程の違いを明らかにする。また、地震波干渉法解析に使用する常時微動波動場を解明し、地震波速度モニタリングのための解析手法の高度化を行う。さらに、地震波速度変化のメカニズム解明へ向けて、地震波干渉法を用いて地震波速度異方性を推定し、地質学的観測データとの比較を行う。

### 4. 研究成果

#### [1] 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地震波速度変化

岩手県遠野市に設置された地震計アレイ観測データを用いて、常時微動干渉法解析と鉛直アレイ解析という2種類の解析を実施した。その結果、両手法それぞれから2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地震波速度変化を検出することができた。常時微動干渉法解析では0.5%程度の地震時速度低下を検出し、周波数が高くなるにつれて地震速度低下量が大きくなる傾向があることがわかった。また、鉛直アレイ解析からは1%程度の速度低下が検出された。2つの解析手法は深さ感度が異なるため、これらの結果を統合して解釈することで地震波速度変化の深さ分布を拘束できると考えられる。また、地震波干渉法解析を過去10年分の遠野アレイデータに適用し、2011年東北沖地震に伴う地震波速度変化の回復過程を調べた結果、地震後の0.5%程度の速度低下は2017年までにほとんど回復していないこと、また、解析周波数範囲の上限の2 Hz程度の周波数帯域ではそれより低周波数帯域に比べて回復速度が早い傾向にあることがわかった(図1)。回復速度の周波数による違いは、深さにより回復過程が異なる可能性を示唆する。

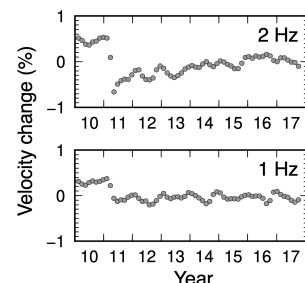


図1. 地震波速度の時間変化

#### [2] 2018年北海道胆振東部地震に伴う地下構造変化

地震波干渉法に基づく自己相関解析により、2018年9月に発生した北海道胆振東部地震に伴う地下構造変化を検出した。速度低下率は2-3%であり、強震動による動的歪みの大きさと相関を持つことから、強震動による浅部地盤の剛性率低下が地震波速度低下の要因であると考えられる。また、地震前後における相関波形形状の変化を捉えることができた。この波形変化は、深さ30 km程度における散乱特性の変化を反映していると解釈でき、本震の断層すべりに伴うクラック形成を検出した可能性がある(図2)。このように、地震波干渉法を用いることで、地表付近だけでなく地下深部の断層帯周辺の構造変化を捉えられることを示した。

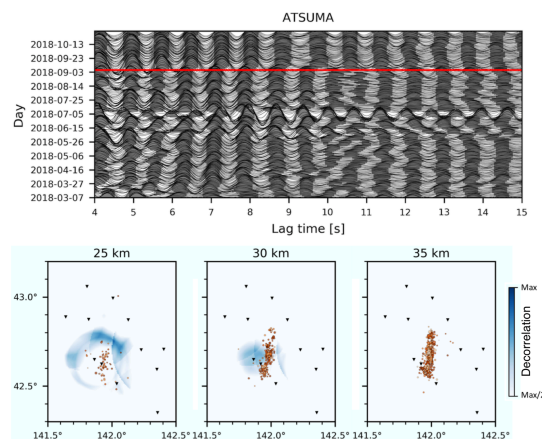


図2. 相関波形変化と散乱特性変化の領域

### [3] 常時微動波動場の解明

地震波速度変化の深さ分布を解明するためには、常時微動波動場の構成成分を理解し、地震波干渉法による合成波形が持つ深さ感度を明らかにする必要がある。そのため、基盤地震観測網 Hi-net および独自に設置した遠野短スパンアレイを用いて、表面波と実体波を含めた常時微動波動場を明らかにした。Hi-net を用いた解析では、脈動振幅が小さい時に遠洋で励起された実体波成分が卓越していることを示し、地下深部構造推定に有用な実体波の抽出に対して新たな示唆を与えた (図 3)。また、表面波成分については、特に常時微動の周波数と海水層の共鳴周波数が一致する領域で効率的に励起されていることがわかった。データとして使用する常時微動の波源位置や構成成分を特定できたことで、常時微動を用いた地震波干渉法解析結果への理解が深まると考えられる。遠野短スパンアレイの解析では、相関波形の経過時間とともに波動場が変化し、地下の異なる深さに感度をもつことを観測から示した。

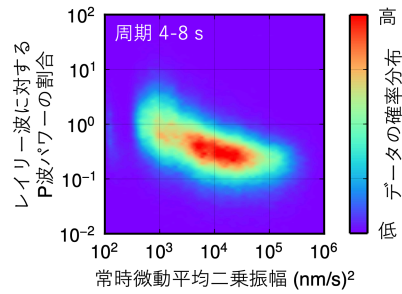


図 3. 常時微動構成成分

### [4] 地震波速度変化メカニズム解明へ向けて

地震波速度時間変化のメカニズムを理解するためには、地震波速度に加えて異方性や地下水など多項目観測データの比較が重要である。そのため、多項目の地球物理学的・水理学的観測が行われているニュージーランド・アルパイン断層における地震観測データを解析した。ボアホール底と地表に設置された地震計で観測された波形データに地震波干渉法解析を適用し、地殻浅部における地震波速度異方性を明らかにした。異方性は下盤側では応力に支配されているのに対し、上盤側の断層破碎帯では異方性の方向が断層走向に平行であり、ボアホールコアの観測から得られている破碎帯内の亀裂や岩石の持つ片理と対応することがわかった。断層破碎帯内に存在する流体は地震波速度を変化させると考えられるため、地震波速度および異方性の時間変化と水理学的観測結果の比較により、地震波速度変化の物理的解釈に迫れる可能性がある。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- [1] **Takagi, R.**, K. Nishida, T. Maeda, and K. Obara (2018), Ambient seismic noise wavefield in Japan characterized by polarization analysis of Hi-net records, *Geophysical Journal International*, 215, 1682-1699, 査読有り.  
<https://doi.org/10.1093/gji/ggy334>
- [2] Toyokuni, G, H. Takenaka, **R. Takagi**, M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, D. Childs, D. Zhao (2018), Changes in Greenland ice bed conditions inferred from seismology, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 277, 81-98, 査読有り.  
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.10.010>
- [3] Chamberlain, C., C. Boese, J. Eccles, M. Savage, L. Baratin, J. Townend, A. Gulley, K. Jacobs, A. Benson, S. Taylor-Offord, C. Thurber, B. Guo, T. Okada, **R. Takagi**, K. Yoshida, R. Sutherland, and V. Toy (2017), Real-Time Earthquake Monitoring during the Second Phase of the Deep Fault Drilling Project, Alpine Fault, New Zealand, *Seismological Research Letters*, 88, 1443-1454, 査読有り.  
<https://doi.org/10.1785/0220170095>
- [4] Maeda, T., K. Nishida, **R. Takagi**, K. Obara (2016), Reconstruction of a 2D seismic wavefield by seismic gradiometry, *Progress in Earth and Planetary Science*, 3:1, 査読有り.  
[doi:10.1186/s40645-016-0107-4](https://doi.org/10.1186/s40645-016-0107-4)

[学会発表] (計 11 件)

- [1] 高木涼太 (2018), 振動軌跡解析に基づく常時微動波動場の特徴, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 招待講演.
- [2] 高木涼太 (2018), ノイズ相関関数のアレイ解析, 超多点・稠密観測で迫る, 地球内部活動・構造研究の新展開.
- [3] **Takagi, R.**, and K. Nishida (2017), Source location of secondary microseisms in Japan, EGU General Assembly 2017.
- [4] 高木涼太・西田究 (2017), Hi-net データの粒子軌跡解析から推定した脈動レイリー波源, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会.
- [5] **Takagi, R.**, and K. Nishida (2017), Dominant source locations of secondary microseisms in Japan estimated by Hi-net data, Joint Scientific Assembly of IAG and IASPEI.
- [6] 高木涼太・西田究 (2017), 日本列島で観測される常時微動の波源と波動場, 「海洋-固体地球システムにおける波動現象と構造不均質性」 「地震波形解剖学の計算科学的新展開」 合同研究集

会.

[7] 高木涼太・他 (2016), 地震波干渉法によるニュージーランド・アルパイン断層近傍における表層付近の S 波異方性の推定, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.

[8] 高木涼太・他 (2016), 地震波干渉法によるニュージーランド・アルパイン断層近傍の S 波異方性の推定, 研究集会「海洋・固体地球システムにおける波動現象と構造不均質性」.

[9] 高木涼太・他 (2016), ニュージーランドアルパイン断層掘削地点とその周辺における地殻浅部 S 波異方性, 日本地震学会 2016 年度秋季大会.

[10] Takagi, R. et al. (2016), Shear wave anisotropy in the vicinity of the Alpine Fault inferred from vertical seismic array observation, Geoscience Society of New Zealand Annual Conference.

[11] Takagi, R. et al. (2016), Seismic anisotropy in the vicinity of the Alpine fault, New Zealand, estimated by seismic interferometry, 2016 AGU Fall Meeting.

〔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 :

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 :

国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名 :

ローマ字氏名 :

所属研究機関名 :

部局名 :

職名 :

研究者番号 (8 桁) :

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名 :

ローマ字氏名 :

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。