

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540449

研究課題名(和文)地震波干渉法を用いた地震波速度時間変化の検出の高度化と物理的解釈

研究課題名(英文) Improving the detection of seismic velocity changes by seismic interferometry and physical interpretations on the changes

研究代表者

中原 恒(Nakahara, Hisashi)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20302078

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)：本研究では、地震波干渉法による地震波速度変化の検出を安定化するために、観測点間の相互相関、単独点の自己相関、単独点の異成分間の相互相関を併用した手法を開発し、実データに適用した。得られた地震波速度変化から、2008年岩手宮城内陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う階段関数的な変化、その後の余効的な変化、そして年周変化を分離することに成功した。地震に伴う変化は強震動による浅部地盤の損傷とその回復による可能性が高い。年周変化は地下水位の変化と関連しているのかもしれない。

研究成果の概要(英文)：We have applied a method to use cross correlations of noise records at two stations, auto correlations at single station, cross-correlations between different components at single station for stably detecting seismic velocity changes in Japan by seismic interferometry. Seismic velocity changes detected have been decomposed into coseismic changes and the following post-seismic exponential decays associated with the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake and the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake (Tohoku-Oki) earthquake, and seasonal variations. Coseismic and post-seismic changes are attributed to damages and their recovery at shallow depths due to strong-ground motion. Seasonal variations may have some relation to changes in the ground-water level.

研究分野：地震学

キーワード：地震波速度変化 地震波干渉法 物理的解釈

1. 研究開始当初の背景

地震波干渉法を用いて、数年間以上の長期間にわたる地震波速度の時間変化を調べていると、地震や火山噴火の発生に伴うステップ関数的な変化の他に、年周的な変化やトレンドなどが観測される。そこで、これらの変動成分を適切に分離し、それぞれの変動メカニズムを理解することを目的とする。変動成分の分離にあたっては、地殻変動データの解析で使われている手法を参考にする。特に、年周変化成分はその要因が明らかではなく、気象観測データと比較し、そのメカニズムの解明に迫る。以上により、地下の地震波速度の時間変化、ひいては応力蓄積過程の理解に貢献できる。

2. 研究の目的

地震波干渉法に基づく地震波速度の時間変化の検出を高度化すること、そしてその結果を物理的に解釈することを目的とする。

3. 研究の方法

常時微動やコーダ波を用いた地震波干渉法により、ストレッチング法と呼ばれる手法で、地下の地震波速度の時間変化の検出を行う。特に、数年間以上の長期間にわたるデータを扱うことにする。また、地震波速度の時間変化の検出を安定化するために、観測点間の相互相関、単独点の自己相関、単独点の異成分間の相互相関を併用する。

得られた地震波速度変化から、地震や火山噴火の発生に伴うステップ関数的な変化、その後の余効的な変化、年周変化成分を分離する手法を開発し、実データに適用する。最後に得られた地震波速度変化の結果を物理的に解釈する。特に、年周変化成分はそのメカニズムが明らかではないため、気温・降水量・積雪量などの気象観測データや地下水位などの水文学的データと比較することにより、その要因を明らかにする。

さらに、地震波干渉法の手法自体を深く理解するために、その適用可能性などについて、理論的な研究も並行して実施する。

4. 研究成果

本研究では、主に常時微動やコーダ波を用いた地震波干渉法により、地下の地震波速度の時間変化の検出を行った。

防災科学技術研究所の KiK-net, K-NET の地表観測点で記録された近地地震のコーダ波の自己相関関数を計算し、東日本の太平洋側で浅部地盤の地震波速度が東北地方太平洋沖地震の本震に伴って最大 50% 近く低下したことを発見した(例えば図 1 参照)。この要因として、地下数 10m までの地盤が強震動により損傷したものと解釈した。この手法は地表における地震波形記録だけから浅部地盤の地震波速度の時間変化を検出する手法であり、ポアホール観測点がない場所でも

使用できる汎用性の高い手法である。ただし、地震波速度変化の推定精度は数%であり、かなり大きな地震波速度変化の検出のみに有効であることもわかった。この成果は Nakahara (2015) として出版された。

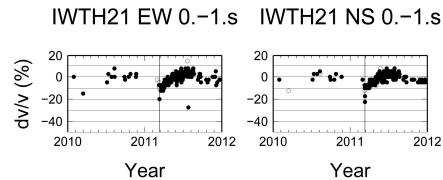


図 1. 地震波速度の時間変化の例。IWTH21 観測点の結果。左は東西動成分、右は南北動成分の結果。2011 年 3 月 11 日に地震に伴い、この観測点では約 20% 程度の地震は速度低下が見られる。

次に、防災科学技術研究所の高感度地震観測網 (Hi-net) のうち東北地方中央部のデータ解析を行った。2007 年から 2011 年半ばまでの期間で、周期 1-2、2-4、4-8 秒の脈動帯域において観測点間の相互相関や単独観測点の自己相関、単独観測点の異成分間の相互相関を計算した。求めた地震波速度変化から、地震時のステップ変化とその後の指数関数的な余効変化と年周変化を分離する手法を開発し、2008 年岩手宮城内陸地震、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う変化、その後の余効変化、年周成分の分離に成功した(図 2)。これらの成果は Hobiger et al. (2014) として出版された。

特に、地震波速度変化の周期性の検出にあたっては、最大エントロピー法に基づく手法を開発して適用したが、全体としては年周変化以外の成分は有意ではないことを確認した。年周変化は、春先に地震波速度が最小になり、秋口に最大になる傾向がある。この結果を気温、降水量などの気象要素、地下水位の水文学的要素との比較したところ、この地域の春先の融雪による地下水位の上昇と春先の地震波速度低下が対応するものと解釈した。この成果については、中原 (2014) で学会発表を行った。

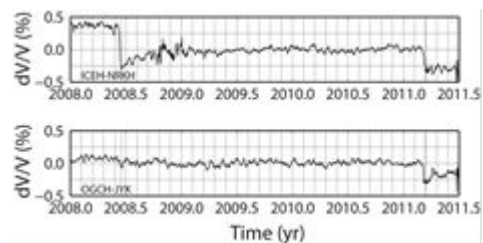


図 2. 地震波速度の時間変化の例。2008 年岩手宮城内陸地震の震源域における結果。上と下は観測点間経路が異なる。2008 年 6 月

14日と2011年3月11日に地震に伴う速度低下が見られる。

さらに、2000年東海スロースリップに伴う変化の検出を目指して、Hi-netの東海地方のデータ解析に着手した。現在のところ、2003年から2010年までの期間で、脈動帯域において観測点間の相互相関を計算したが、スロースリップに伴う変化は明瞭には観測できていない一方で、最大で0.5%程度に達する年周変化成分を検出した。この原因については引き続き検討を進めていく必要がある。

以上のようなデータ解析研究に加えて、地震波干渉法をより深く理解するための理論的研究も実施した。特に、減衰性媒質においても地震波干渉法が成立するかどうかに関する検討を行った。地震波干渉法が厳密に成り立つためにはノイズが空間一様に分布する必要があり、もしそうでなければゴーストが生じることを示した。現在、地震波干渉法に基づいて地下の地震波減衰構造を推定する手法が提案されているが、この手法は近似式に基づいており厳密式が別に存在すること、そしてその近似式の適用可能条件を理論的に明らかにした。これらの成果は、Nakahara (2012)と中原 (2013)として出版された。

さらに本研究では、2次元減衰性無限媒質中の非一様なノイズ分布に対する地震波干渉法の具体的な表現を求め、いくつかの分布に対しては解析的な表現を得た。これらは、ノイズ源の非一様性の影響を定量的に理解する上で有益である。この成果については中原 (2013)として学会発表を行った。

地震波干渉法の理論において、グリーン関数の相反性を利用すると、震源と観測点を入れ替えることができ、地震波干渉法の問題が震源イメージングの問題と等価になることが分かった。そして、地震波干渉法の知見を利用して、震源イメージングの空間分解能に関する解析的表現を得ることができた。この成果は、Nakahara and Haney(2015)として出版された。

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 5 件)

Nakahara, H., and M. Haney, Point spread functions for earthquake source imaging: An interpretation based on seismic interferometry, *Geophys. J. Int.*, 査読有, VOL202, 2015, 54-61, doi: 10.1093/gji/ggv109.

Nakahara, H., Auto correlation

analysis of coda waves from local earthquakes for detecting temporal changes in shallow subsurface structures: the 2011 Tohoku-Oki, Japan Earthquake, *PAGEOPH*, 査読有, VOL172, 2015, 213-224, doi:10.1007/s00024-014-0849-0

Hobiger, M., U. Wegler, K. Shiomi, and H. Nakahara, Single-station cross-correlation analysis of ambient seismic noise: Application to stations in the surroundings of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, *Geophys. J. Int.*, 査読有, VOL198, 2014, 90-109, doi: 10.1093/gji/ggu115

中原恒, 地震波干渉法により減衰構造を求めるための理論的背景, *地震*, 査読有, VOL65, 2013, 243-249, doi:10.4294/zisin.65.243

Nakahara, H., Formulation of the spatial auto-correlation (SPAC) method in dissipative media, *Geophys. J. Int.*, 査読有, VOL190, 2012, 1777-1783, .doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05591.x

〔学会発表〕(計 9 件)

中原恒, 地震波速度のスペクトル解析, 日本地震学会 2014 年度秋季大会, 2014 年 11 月 25 日, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市)

中原 恒, Haney Matthew, 震源イメージングに対する点広がり関数, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 神奈川, 2014 年 4 月 29 日, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)

Nakahara, H., Auto correlation analysis of coda waves from local earthquakes for detecting temporal changes in shallow subsurface structures - The 2011 Tohoku-Oki, Japan, earthquake -, アメリカ地球物理学連合秋季大会, 2013 年 12 月 12 日, モスコニセンター (サンフランシスコ (USA))

中原恒, 2 次元減衰性媒質における非一様なノイズ分布に対する地震波干渉法の具体的な表現, 日本地震学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 10 月 9 日, 神奈川県民ホール (神奈川県横浜市)

中原恒, 減衰性媒質における SPAC 法の定式化, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, 2012 年 10 月 18 日, 函館市民会館 (北海

道函館市)

中原恒, 地震波干渉法により減衰構造を
求めるための理論的背景, 日本地球惑星
科学連合 2013 年大会, 千葉, 2013 年 5
月 20 日, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

中原恒, コーダ波の自己相関解析による
浅部地下構造の時間変化の検出 K-NET
データへの適用, 日本地震学会 2012 年度
秋季大会, 2012 年 10 月 18 日, 函館市民
体育館(北海道函館市)

Nakahara, H., Formulation of the SPAC
method in a dissipative medium, ヨー
ロッパ地震学会, 2012 年 8 月 20 日, ロ
シア科学アカデミーモスクワ本部(モス
クワ(ロシア))

中原恒, コーダ波の自己相関解析による
浅部地下構造の時間変化の検出, 日本地
球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉, 2012
年 5 月 23 日, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

(3)連携研究者
無

〔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:
出願年月日:
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

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

(2)研究分担者

無