

機関番号：11301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740248

研究課題名 (和文) 地震波干渉法の理論的背景に関する研究と浅層地盤探査への応用

研究課題名 (英文) Theoretical study on seismic interferometry and its application to shallow subsurface exploration

研究代表者

中原 恒 (NAKAHARA HISASHI)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：20302078

研究成果の概要 (和文)：

従来の地震学においては、地球内部の不均質構造により生成される多重散乱波は「ノイズ」として除去されることが多かった。しかし近年、地震波干渉法と呼ばれる手法が出現して以降、これらは「ノイズ」ではなく極めて有益な「信号」であることが理解されつつある。本研究では、多重散乱波と地震波干渉法に関する基礎的な理解を深めるとともに、それをを用いた浅層地盤構造の推定手法の構築と適用、さらに地盤構造の時間変化の検出に成功し、多重散乱波と地震波干渉法の有効性を一層高めることができた。

研究成果の概要 (英文)：

Multiple scattering waves have been often considered to be “noise” in seismology, and have been filtered out in the analysis of seismograms. However, benefit of multiple scattering waves for clarifying small-scale heterogeneities in the Earth is reappraised after the recent advent of seismic interferometry. In this study, we have been able to understand seismic interferometry in deeper depth. Based on our new findings, we have developed a method for exploring shallow subsurface velocity structures, and applied the method to real data successfully. Through these studies, we have been able to improve the applicability and usefulness of seismic interferometry and multiple scattering waves.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：固体地球惑星物理学

キーワード：地震現象，地震波干渉法

## 1. 研究開始当初の背景

地震学では、地震波干渉法と呼ばれる手法が注目されている。この手法では、観測される地震波動場の 2 観測点における相互相関から、その 2 点間の伝達関数 (グリーン関数) を求めることができる。その際、地震波のコ

ーダ (多重散乱) 波などのいわば「ノイズ」を利用することにより、人工地震探査と同様の状況を人工震源を必要とせずに再現できる可能性がある。このような経済性・実用性の高さに加えて、なぜそのようなことが成り立つのかという学術的な面白さもあり、地震

波干渉法が大きな注目を集めているのが研究開始当初の現状であった。

## 2. 研究の目的

研究代表者は、日本が世界に誇る貴重な地震観測データを、地震波干渉法の新しい枠組みで解釈し、地震学（特に強震動の分野）に生かしていくことが重要だと考えてきた。そのため、地震波干渉法についての理解を深めるとともに、それに基づき強震動評価に重要な浅層地盤構造の推定手法の構築を目指し、理論的証明とデータ解析を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 表面波を用いた解析

① 地表の2観測点に常時微動や表面波のように横から波動が入射する場合、どのような条件のもとで地震波干渉法が成立するのかを理論的に明らかにする。

② その知見に基づき、2点の波動場の相関から2台の地震計の間の地震波速度構造を推定する手法を構築する。

③ 地震波速度構造の時間変化を検出する。

④ 独自の稠密アレイ観測データに適用して、地下浅部の地震波速度構造の推定を試みる。

### (2) 実体波を用いた解析

① 鉛直ボアホールの上（地表）と下（地中）に2台の地震計がある場合を想定し、その2点に実体波のように下から波動が入射する場合、どのような条件のもとで地震波干渉法が成立するのかを理論的に明らかにする。

② それらの知見に基づき、2点の波動場の相関からその2点間（地表から深さ100~200mまで）の地震波速度構造を推定する手法を構築する。

③ さらにその時間変化を検出する。

### (3) 地震波散乱波の基礎的理解

地震波干渉法をより深く理解するためには、その信号源の特性の理解が不可欠である。そのため、地震波の多重散乱波の基礎的理解を深めるため、データ解析と理論的考察を行い、以下の性質を明らかにする。

① 地震波散乱波の統計的揺らぎ。

② 地震波散乱波のエネルギー等分配とP波、S波のエネルギー平衡。

## 4. 研究成果

### (1) 表面波を用いた解析

① 2004年新潟県中越地震の震源域付近にある6観測点において、表面波からなる常時微動の連続記録に地震波干渉法を適用することにより、浅部地盤構造の調査を行った。その結果、本震の発生に伴い、全観測点で、最

大0.5%程度の地震波速度低下が検出された。その要因としては、強震動による浅部地盤の損傷や断層運動による周囲の破碎などが考えられる。

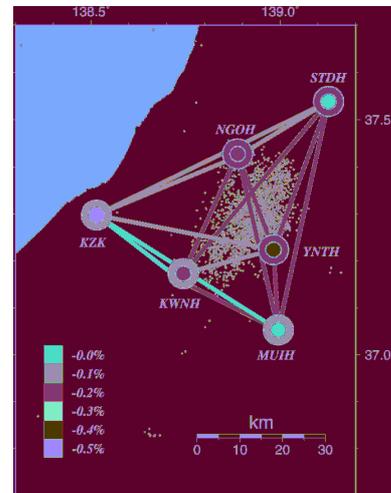


図1 2004年新潟県中越地震の震源域での地震波速度変化 [Wegler et al, 2009より]. 丸は観測点周辺、線は観測点間の変化を表す。色の濃淡で変化量を表す。

② 2005年福岡県西方沖地震の震源域における1観測点のデータに地震波干渉法を適用し、観測点周辺の地震波速度が本震に伴って約1.5%低下したことを発見した。その要因としては、強震動による浅部地盤の損傷が考えられる。

③ 宮城県牡鹿半島において、口径約500m、平均間隔約150mの7台の強震計からなる稠密アレイ観測を継続し、データを収集した。地震波干渉法による地盤構造推定について着手した。

④ 表面波を用いた地震波干渉法の理論的研究については、残念ながら進展がなかった。

### (2) 実体波を用いた解析

① 水平成層構造の地表と地中にある観測点に、スカラー (SH) 平面波が斜め下方から入射する場合の証明を行った。2観測点間の波動場の相互相関関数の時間積分が、グリーン関数と震源時間関数との畳みこみに比例することが明らかになった。その際、スローネスが帯域制限されること、鉛直方向のスローネスが重みとしてかかることが重要である。

②地震波干渉法を改良したデコンボリューション干渉法を構築し、防災科学技術研究所の強震観測網 KiK-net のデータに適用した。その結果、2000年鳥取県西部地震の震源域周辺の観測点において、浅部地盤構造を推定できた。また本震発生後に、浅部0-11mのS波速度が30%程度低下し、その後4年ほどかけて時間の対数に比例して、本震前の状態に回復していくことを発見した。

### (3) 地震波散乱波の基礎的理解

①地震波干渉法の成立条件にかかわるエネルギー等分配について、近地地震の波形記録の粒子軌跡を用いて検討した。その結果、直達S波走時の1.5倍程度の経過時間で粒子軌跡が安定化していることが明らかになった。また粒子軌跡は、水平成層構造における表面波、実体波を含めたエネルギー等分配を仮定した理論計算により、うまく説明できることが分かった。これは地震コーダ波において、エネルギー等分配が成立していると考えてもよいことを意味する。

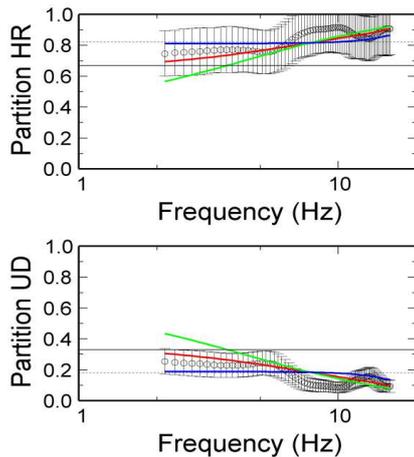


図2 近地地震のコーダ波の粒子軌跡の周波数依存性（上が水平動，下が上下動成分）[Nakahara and Margerin, 2011]より]. データ（白丸）は標準偏差（棒）

②2次元無限等方散乱媒質において、等方震源からのP波、S波のエネルギー伝播を輻射伝達理論に基づき定式化した。直達項と1次散乱項は解析的に、2次以上の多重散乱項は数値計算で評価できる。この定式化を用いて、エネルギー等分配の証拠となるP波、S波のエネルギー平衡を考察した。その結果、ポアソン媒質における平衡状態でS波エネルギーはP波の3倍となること、遷移時間はP波

とS波の変換散乱係数に依存することが明らかになった。

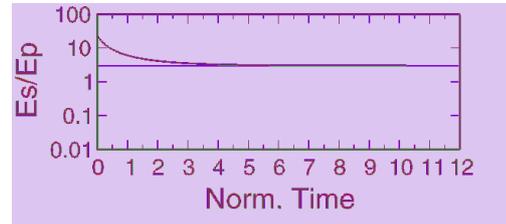


図3 2次元無限ランダム媒質中でのS波とP波のエネルギー比の時間変化 [Nakahara and Yoshimoto, 2011]より].

P波平均自由時間の3倍程度でエネルギー平衡の状態に達している。

③地震波エンベロープの統計的ゆらぎが仲上m分布に従うことが近年明らかになってきた。そこで、エンベロープ振幅のゆらぎを特徴づけるm値を、仲上m分布を仮定した最尤法により推定する手法を開発した。またその手法を近地地震のコーダ波に適用することにより、m値は平均として1であることを発見した。

## 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6件）

① Nakahara, H., and L. Margerin, Testing equipartition for S-wave coda using borehole records of local earthquakes, Accepted by Bull. Seismol. Soc. Am., 査読有, 2011.

② Nakahara, H., and K. Yoshimoto, Radiative transfer of elastic waves in two-dimensional isotropic scattering media: Semi-analytical approach for isotropic source radiation, Accepted by Earth, Planets and Space, 査読有, 2011.

③ Nakahara, H., and E. Carcole, Maximum-likelihood method for estimating coda Q and the Nakagami-m parameter, Bull. Seismol. Soc. Am., 査読有, 100, 3174-3182, 2010.

④ 東北大学大学院理学研究科（中原恒），

地震波干渉法による地下構造のモニタリング：2005年福岡県西方沖地震 (Mj7.0)，地震予知連絡会会報，査読無，83，654-656，2010.

⑤ Wegler U., H. Nakahara, C. Sens-Schoenfelder, M. Korn, and K. Shiomi, Sudden drop of seismic velocity after the 2004 Mw6.6 mid-Niigata earthquake, Japan, observed with Passive Image Interferometry, J. Geophys. Res., 査読有，114, B06305, doi:10.1029/2008JB005869, 2009.

⑥ Sawazaki K., H. Sato, H. Nakahara, and T. Nishimura, Time-lapse changes of seismic velocity in the shallow ground caused by strong ground motion shock of the 2000 Western-Tottori Earthquake, Japan, as revealed from coda deconvolution analysis, Bull. Seism. Soc. Am., 査読有，99, 352-366, doi:10.1785/0120080058, 2009.

[学会発表] (計6件)

① 中原 恒・吉本 和生，2次元等方散乱媒質における弾性波の輻射伝達，日本地震学会秋期大会，広島，2010年10月29日.

② Nakahara, H. and L. Margerin, A test of the equi-partition hypothesis for S-wave coda using borehole records of local earthquakes, The Meeting of the Americas, Foz do Iguacu, Brazil, 2010年8月9日.

③ 中原 恒・Eduard Carcole, 仲上 m 分布に基づく地震波エンベロープのゆらぎの測定，日本地球惑星科学連合 2010 年大会，千葉，2010年5月25日.

④ 中原 恒，エネルギー分配の観点からみた S 波コーダの粒子軌跡(3)，日本地球惑星科学連合 2009 年大会，千葉，2009年5月18日.

⑤ Nakahara, H., Semblance for three-component data of small seismic arrays, IASPEI General Assembly, Cape Town, South Africa, 2009年1月14日.

⑥ 中原 恒，エネルギー分配の観点からみた S 波コーダの粒子軌跡(2)，日本地球惑星科学連合 2008 年大会，千葉，2008年5月25日.

[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

中原 恒 (NAKAHARA HISASHI)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：20302078

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし