

令和 2 年 4 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05528

研究課題名(和文) コーダ波干渉法の高度化に関する基礎研究

研究課題名(英文) Basic research on the upgrade of coda-wave interferometry

研究代表者

中原 恒 (Nakahara, Hisashi)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：20302078

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)：コーダ波干渉法に基づき、大・中地震や火山噴火に伴う地下構造の時間変化を検出し、変化した場所を推定するために、感度カーネルの高度化を実施した。地震波速度、地震波散乱特性に対する感度カーネルについて、地震波の成分情報を有効に利用するために、ベクトル波に対する定式化を行った。観測点において地震波の振動方向にエネルギーを射影する準ベクトル波近似に基づき2次元1次散乱理論、3次元1次散乱理論に基づく定式化に成功した。さらに、コーダ波干渉法の別の利用法として、近接する実体力源に対するレイリー波のデコリレーションの定式化に成功し、特に深さが浅い力源間の距離を推定する枠組みを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コーダ波干渉法において、感度カーネルは地下構造が時間変化した場所を決める際に重要な役割を果たす。しかし、これまでのモデルでは、地震波の振動成分(上下、南北、東西方向)の情報をうまく取り込めていなかった。そこで本研究では、振動成分の情報を取り入れる(ベクトル波の定式化を行う)ことにより、コーダ波干渉法の感度カーネルの高度化を行った。1次散乱近似と準ベクトル波近似に基づき感度カーネルの解析表現の導出に成功した。この感度カーネルのベクトル化により、コーダ波干渉法において地震波の振動成分を有効利用する方法を明らかにし、今後地下構造の時間変化の場所を精度よく推定するための基礎を構築したことになる。

研究成果の概要(英文)：Regarding studies on sensitivity kernels for coda-wave interferometry, we have tried to consider wave components. Based on the single-scattering approximation and a quasi-vector wave approximation, we have succeeded in formulating sensitivity kernels for locating regions of seismic velocity or scattering property changes in 2D and 3D media. The single scattering approximation enabled us to derive analytical expressions for the sensitivity kernels. These results can be used to real data under the single scattering framework. As another application of coda-wave interferometry, we have also succeeded in formulating Rayleigh-wave coda decorrelation for closely located single forces. This result can be used to determine the separation distance of shallow nearby sources. In this way, we have upgraded the sensitivity kernels in coda-wave interferometry.

研究分野：地震学

キーワード：コーダ波干渉法 感度カーネル 走時 地震波散乱 時間変化

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

- (1) コーダ波干渉法において地下構造の時間変化の場所の推定する際、**感度カーネル**を利用する必要がある。しかし、これまでのモデル化では、スカラー波の枠内にとどまっておき、ベクトル情報、つまり地震波の3成分(上下動、東西動、南北動)、の扱い方が理論的に未解明であった。またスカラー波の枠組みにおいても、モデル化が尽くされているわけではなく、例えば実体波に適した3次元一次散乱モデルの定式化はまだ行われていなかった。
- (2) コーダ波干渉法の別の利用法として、波形のデコリレーションから近接した震源間の距離を推定する手法があるが、これまでは無限媒質中の実体波に対する定式化しかなく、地表の影響が顕著な浅い震源に適用するのが困難であった。

### 2. 研究の目的

- (1) コーダ波干渉法の基礎にまで立ち返り、コーダ波干渉法の手法の高度化を進める。従来のモデル化が不十分であった部分、とくに**ベクトル情報(地震波形の成分ごとの違い)を有効に利用した理論**を新たに展開し、それに基づく手法を開発する。
- (2) コーダ波のデコリレーションから近接した震源間の距離を推定する手法を半無限媒質の場合に拡張し、浅い震源に適用できるように拡張する。

### 3. 研究の方法

#### (1) コーダ波の感度カーネルの定式化

コーダ波の走時変化と波形変化(デコリレーション)に関する感度カーネルの定式化を行う。走時変化については、スカラー波の枠組みで3次元1次散乱理論に基づく定式化を行う。次に、従来のスカラー波の枠組みを超えて、ベクトル波の定式化を行う。振動成分を取り込んだ2次元1次散乱理論、3次元1次散乱理論に基づく定式化を進める。デコリレーションについては、スカラー波の定式化はすでに行われているので、ベクトル波の定式化を行う。

#### (2) 数値計算による感度カーネルの定式化の検証

(1)で導出した感度カーネルを、差分法に基づく地震波動伝播の数値計算により検証する。1次散乱理論に基づく定式化なので、多重散乱が卓越する状況では適用できないことが予想されるため、その適用範囲を数値的に検討する。

#### (3) コーダ波のデコリレーションの震源間距離変化に対する定式化

コーダ波のデコリレーションの震源間距離変化について、理論的手法と数値的手法を併用して検討する。特に地表の観測点に対しては、自由表面の影響が無視できないので、その影響を評価する。

#### (4) コーダ波干渉法に基づく実データの解析

コーダ波干渉法に基づき実際のデータ解析を行う。地下構造の時間変化の検出と変化域の場所の推定、感度カーネルを計算する際に必要となる地震波散乱・減衰パラメタの推定、地下構造のモニタリングの際に有効な平常時の地震波速度変化の統計的性質の推定などを行う。

### 4. 研究成果

- (1) コーダ波の走時の感度カーネルをスカラー波1次散乱理論に基づき3次元の場合に拡張した。またこのカーネルの適用可能性を検証するため、スパコンを用いて3次元ランダム媒質中のスカラー波の伝播を差分法に基づき数値計算し、理論と比較した。その結果、直達波が地震波速度低下域を通過しない観測点では、解析的な感度カーネルから期待されるコーダ波の走時変化と差分計算による結果とはよく一致した。一方で、直達波が地震波速度低下域を通過する観測点では、解析的なカーネルによる期待値は数値計算より走時変化を過小評価することが分かった。これは2次元の場合と異なる結果であり、3次元の場合は直達波の影響が少し強いのかもかもしれない。この成果は、中原と江本の共著論文として国際学術誌に掲載された。
- (2) これまでコーダ波走時の感度カーネルの定式化はスカラー波の枠組みにとどまっていたが、実際の地震波はベクトル波であるため、感度カーネルのベクトル化への取り組みを開始した。観測点での地震波の振動方向にエネルギーを射影する準ベクトル波近似により、1次散乱理論に基づき2次元、3次元の定式化に成功した。感度カーネルは解析的に表現できる。図1

に 1 例を示す．その場所で地震波速度が変化したら，その影響が観測点のコーダ波にどれだけ影響するかを表したものであり，震源と観測点にピークを持つが，形状は振動方向に依存する．例えば左図では赤字で示すように波線が  $y$  軸に沿って観測点に入射すると， $P$  波は  $x$  成分にエネルギーを持たないため，ピークはその方向に小さい．

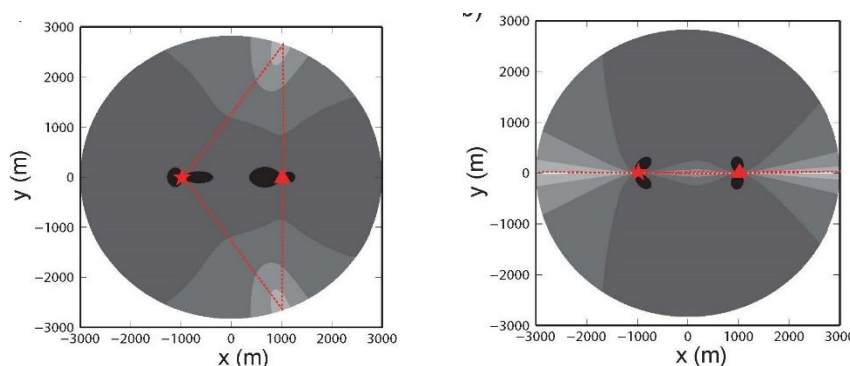


図 1．2 次元ベクトル波の場合の感度カーネルの例（左： $x$  成分，右： $y$  成分）．星印が震源，三角印が観測点を表す．色が濃いほど振幅が大きい．赤点線は波線の例．

- (3) 雑微動の相互相関関数のデコリレーションの感度カーネルについて，これまでは，スカラー波を仮定したモデル化のみが行われていた．しかし実際の地震波はベクトル波であるため，問題があった．そこで，2 次元 1 次等方散乱モデルに基づき，デコリレーション変化の近似ベクトル感度カーネルを新たに導出した．1 次散乱なのでカーネルは散乱殻上のみ感度をもつことを確認した．また，感度カーネルがゼロになる場所が存在し，それらの場所は水平成分と鉛直成分とは異なることが分かった．
- (4) コーダ波干渉法に基づき，コーダ波のデコリレーションを用いて，2 つの震源間の距離を推定する手法のモデル化に，自由表面の影響を取り入れることに成功した．具体的には，3 次元半無限均質媒質を考え，特に浅い実体力源に対するレイリー波を考慮した．その結果，レイリー波のコーダのデコリレーションから実体力源間の水平方向の距離を推定できることが明らかになった．火山の爆発地震や核実験等に利用できる可能性がある．
- (5) コーダ波干渉法で地震波速度変化や散乱特性の変化の時空間変化を求める際に用いる感度カーネルの計算には，媒質の散乱係数と内部減衰係数が必要である．従来は周辺で発生した自然地震や人工地震のデータを用いて，これらのパラメータを推定していた．我々は，地震波干渉法に基づく雑微動の相互相関のデータを使用して，地震のデータを用いなくてもよい手法を新たに開発した．相互相関の計算の際に Temporal flattening という規格化を用いることが重要であることが分かった．この成果は，Hirose et al. (2019) として国際学術誌に掲載された．
- (6) 地震波干渉法による地震波速度変化のモニタリングを自動化するための基礎研究として，平常時の地震波速度変化が従う統計的分布を調べたところ，多くの場合図 2 に示すようにガウス分布に従うことが分かった．一方で，桜島火山では切断レイリー分布によって説明されることが明らかになった．火山性微動が発生していない日のみの地震波速度変化の統計分布を調べたところ，ガウス分布へのあてはめが良くなったため，ノイズに埋もれた小規模な火山性微動等が影響していることが示唆された．この成果は現在国際学術誌 Geophysical Journal International に投稿中である．

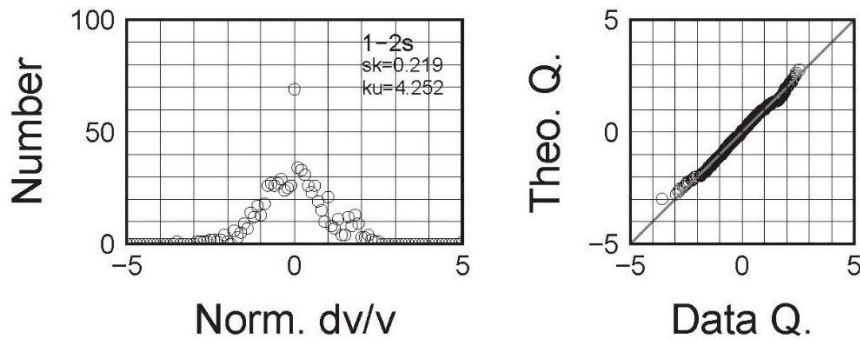


図 2 . 地震波速度変化の統計的性質の例 . ヒストグラム ( 左 ) と正規 Q-Q 図 ( 右 ) . 正規 Q-Q 図上で直線性を示せばデータはガウス分布でよく説明できる .

- (7) 桜島で地震波干渉法を用いたデコリレーション変化のモニタリングを行ったところ、2015 年 8 月 15 日のダイク貫入イベントの前の 2015 年 4 月頃からデコリレーションのゆっくりとした増加が見られ、7 月には中央部の観測点ペアに対して急激なデコリレーションの増加が見られた . このような先行的な変化の検出は、地震波干渉法が火山のモニタリングに有用であることを示す証拠である .
- (8) 地震波干渉法に基づき、雑微動の相互相関関数のデコリレーションを用いて、2008 年岩手宮城内陸地震に伴う地震波散乱特性の変化を検出した . レイリー波コーダと考えて、感度カーネルを用いて散乱特性の変化領域を線形インバージョンにより推定した . 周辺の 17 観測点のデータを使用した結果、震源域の南部で地震波散乱特性が大きく ( 97% も ) 変化したことが明らかになった . この領域では、本震時の断層滑り量が大きく、また 4g を超える最大加速度の強震動が観測された地域にあたり、そのような要因が影響している可能性がある . さらに、少数の観測データを有効に利用するスパースモデリングを用いた解析を行ったところ、震源域をうまく取り囲めば僅か 5 観測点だけでも、地震波散乱特性の空間変化を適切に推定できることが分かった . そのため、スパースモデリングは特に地震観測点が粗な領域において特に有効に活用できることが示された . この成果は現在国際学術誌 Journal of Geophysical Research に投稿中である .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Emoto, K. and H. Sato	4. 巻 215
2. 論文標題 Statistical characteristics of scattered waves in three-dimensional random media: comparison of the finite difference simulation and statistical methods	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophys. J. Int.	6. 最初と最後の頁 585-599
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggy298	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirose, T., H. Nakahara and T. Nishimura	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 A passive estimation method of scattering and intrinsic absorption parameters from envelopes of seismic ambient noise cross correlation functions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophys. Res. Lett.	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018GL080553	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Emoto, K., T. Saito and K. Shiomi	4. 巻 211
2. 論文標題 Statistical parameters of random heterogeneity estimated by analysing coda waves based on finite difference method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1575-1584
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggx387	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakahara, H., and K. Emoto	4. 巻 174
2. 論文標題 Deriving sensitivity kernels of coda-wave travel times to velocity changes based on the three-dimensional single isotropic scattering model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Pure and Applied Geophysics	6. 最初と最後の頁 327-337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00024-016-1358-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirose, T., H. Nakahara and T. Nishimura	4. 巻 69
2. 論文標題 Combined use of repeated active shots and ambient noise to detect temporal changes in seismic velocity: application to Sakurajima volcano, Japan	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth Planets Space	6. 最初と最後の頁 42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-017-0613-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Emoto K.	4. 巻 26
2. 論文標題 Synthesis of Seismic Wave Envelopes Based on the Markov Approximation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications. Mathematics for Industry	6. 最初と最後の頁 127-142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-10-2633-1_9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計16件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 廣瀬 郁・中原 恒・西村 太志・Michel Campillo
2. 発表標題 Estimation of spatio-temporal changes of seismic scattering property associated with the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake from sparse modeling of seismic ambient noise CCFs
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisashi Nakahara
2. 発表標題 Statistical Characteristics of Observed Seismic Velocity Changes
3. 学会等名 IUGG 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中原 恒
2. 発表標題 地震波速度変化の統計的特徴(3)
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Emoto
2. 発表標題 Numerical Analysis of the Lapse Time Dependence of the Angular Distribution of Coda Waves
3. 学会等名 IUGG 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江本賢太郎・西村太志・中原恒・三浦哲・山本希・杉村俊輔・植田尚大・石川歩・木村恒久
2. 発表標題 光ファイバーとDASを用いた吾妻山における地震観測: 稠密観測による不均質構造の推定
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中原 恒
2. 発表標題 地震波速度変化の統計的特徴(2)
3. 学会等名 日本地震学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 廣瀬 郁・中原 恒・西村 太志
2. 発表標題 Estimation of scattering and intrinsic absorption parameters using envelopes of ambient seismic noise cross-correlation functions
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中原 恒・高野 智也・高木 涼太・江本 賢太郎
2. 発表標題 レイリー波コーダのデコリレーションを用いた浅い実体力源間の距離の推定
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 江本賢太郎
2. 発表標題 3次元差分法を用いた散乱波分布の経過時間依存性の解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中原 恒・江本 賢太郎
2. 発表標題 コーダ波のデコリレーションの近似ベクトル感度カーネル：2次元1次散乱の場合
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 廣瀬 郁・中原 恒・西村 太志
2. 発表標題 Detection of spatio-temporal changes of seismic scattering properties with seismic interferometry: Dike intrusion event on 15 August 2015 at Sakurajima volcano
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中原 恒
2. 発表標題 地震波速度変化の統計的特徴
3. 学会等名 日本地震学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nakahara, H., and K. Emoto
2. 発表標題 Approximate vector sensitivity kernels of coda waves to seismic velocity changes based on the scalar single isotropic scattering model
3. 学会等名 IAG-IASPEI Joint Assembly (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hirose, T., H. Nakahara, and T. Nishimura
2. 発表標題 Spatio-temporal changes of seismic scattering properties associated with the dike intrusion on 15 August 2015 at Sakurajima volcano, Japan, detected by seismic interferometry
3. 学会等名 IAG-IASPEI Joint Assembly (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中原 恒・江本 賢太郎
2. 発表標題 地震波速度変化に対するコーダ波の感度カーネルの定式化：ベクトル波への拡張（1）
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中原 恒・江本 賢太郎
2. 発表標題 地震波速度変化に対するコーダ波のベクトル感度カーネルの定式化：3次元1次等方散乱の場合
3. 学会等名 日本地震学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	江本 賢太郎  (Emoto Kentaro)  (80707597)	東北大学・理学研究科・助教    (11301)	