

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：82109

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2023

課題番号：18K13622

研究課題名（和文）内部減衰と散乱減衰の3次元不均質構造推定-震度予測の高度化へむけて

研究課題名（英文）3-D heterogeneous distribution of intrinsic and scattering attenuation parameters: towards the accurate prediction of seismic intensities

研究代表者

小木曾 仁 (Ogiso, Masashi)

気象庁気象研究所・地震津波研究部・主任研究官

研究者番号：40739140

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、人間が揺れを感知しやすい比較的短周期の帯域における地震波減衰の3次元構造を、地震波エネルギーの減少に起因する内部減衰と地震波散乱に起因する散乱減衰に分けて推定し、得られた構造を地震動予測に活用することを目的とする。開発した手法を西南日本地域に適用したところ、九州地方と近畿・中国・四国地方のテクトニクスの違いを反映したと考えられる減衰構造が得られ、また、得られた構造は地震動即時予測における最大値や揺れの継続時間の予測精度向上に寄与することを確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震波の内部減衰や散乱パラメータは、地震波速度などと同様に媒質を特徴づけるパラメータであり、これらの3次元分布の推定は日本列島のテクトニクスの理解に不可欠である。さらに、内部減衰や散乱パラメータは地震波振幅の大きさに影響するパラメータでもあるから、これらの3次元分布は地震の揺れの大きさを予測するうえでも重要である。本研究では西南日本の各地域のテクトニクスの違いを反映する不均質構造が得られたとともに、この構造が即時的な地震動予測にも有効であることを示した。

研究成果の概要（英文）：This study aims to estimate the 3-D heterogeneous distribution of intrinsic and scattering attenuation parameters. We applied the developed method to the southwestern Japan region. The result seems to reflect different tectonics between Kyushu and other regions. In addition, we confirmed that the estimated attenuation structure helps improve the prediction accuracy of the real-time ground motion framework based on the real-time monitoring of wavefield and simulation of energy propagation.

研究分野：地震学

キーワード：地震波減衰 地震波散乱 不均質構造 強震動予測 地震動即時予測

1. 研究開始当初の背景

近年の地震災害の発生や南海トラフ巨大地震の切迫性などを受け、強震動予測の重要性はますます高まっている。将来の地震災害の低減を目指すにあたり、未来の揺れを予測する強震動予測の高度化は必須である。最も精度が高い強震動予測は、予測対象地震の近傍で発生した過去の地震波形を活用することであるが、即時的な強震動予測のような過去の記録の使用が困難な場合はどうするか。強震動の大きさは震源特性・伝播経路特性・観測点ごく近傍の地盤(サイト)増幅特性の3要素で決まるため、これらの適切な推定が精度の高い強震動予測につながる。本課題では特に伝播経路特性、その中でも地震波減衰特性に焦点を当てる。

人間が地震の揺れを感じる周波数帯は比較的短周期である。この周波数帯における地震波減衰は、媒質に地震波エネルギーが吸収される内部減衰と、媒質内で地震波散乱が発生することによってエネルギーの再分配が発生する散乱減衰の2種に分類できる。内部減衰は地震波エネルギーが失われるため、地震動振幅の減少として寄与するが、地震波散乱の過程ではエネルギーが保存されるため、散乱減衰は地震動振幅の変動とともに地震動の継続時間にも影響する。すなわち、これら2種の地震波減衰を分離して推定した減衰構造モデルは、揺れの大きさとともに、揺れの継続時間もあわせた高度な地震動予測を可能とする。

2. 研究の目的

本研究では、後続波(コーダ波)も含めた波形全体に着目して、地下の不均質な減衰構造を内部減衰と散乱減衰に分離し、それらの3次元分布を周波数ごとに推定する。そして、得られた減衰構造を活用した高度な震度予測の可能性検証を目的とする。コーダ波はその性質から、地震のエンベロープ波形そのものが観測データとなるため、データ量が膨大となる。そのため、大量データの効率的な解析を可能とする、逆問題としての内部減衰と散乱減衰を分離推定する手法を確立する。また、得られた減衰構造を利用して計算される地震波エンベロープを震度予測のグリーン関数として利用する。このグリーン関数が震度の最大値のみならず継続時間も含めた高度な震度予測を可能としていることを検証する。

3. 研究の方法

(1) 減衰構造推定のためのエンベロープ波形のインバージョン手法の確立

Takeuchi (2016)による差分エンベロープの計算手法を利用して、エンベロープ波形の差分からリファレンス構造に対する接道を求めるインバージョンプログラムを作成する。また、復元できる減衰構造の解像度をさらに向上させるため、直達波付近の情報を適切な形でインバージョンに取り込める方法を検討する。

(2) 現実の観測データを利用するための震源特性・サイト特性の推定

本研究では波形の振幅情報を利用するため、震源及びサイト特性の影響を見積もる必要がある。Eulenfeld and Wegler (2016)は地震波エンベロープ全体に着目して、平均的な伝播経路特性(内部減衰及び散乱減衰)・震源特性・サイト特性を同時に推定する手法を開発した。彼らの研究は本研究と共通点があり親和性が高いので、現実的な地震波速度構造の影響を考慮するように拡張したうえで彼らの手法で震源・サイト特性を推定する。

(3) 実データを利用した3次元不均質構造の推定

(1)で確立した手法と(2)で推定した震源・サイト特性の成果を合わせて、実際の3次元不均質減衰構造推定に取り組む。構造不均質の程度が比較的弱い中国・四国地方と、不均質の強い九州地方を対象として減衰構造を推定し、その結果を比較・検討して、不均質構造推定手法の有効性の確認と改良を行う。

(4) 得られた減衰構造を用いた高度な震度予測の可能性の検証

実際の観測波形から震度の時系列(震度エンベロープ)を作成し、不均質減衰構造を用いて計算した震度エンベロープと比較して、特に予測に活用できる情報に限りがある即時的な強震動予測への応用を念頭に、震度の最大値のみならず継続時間の再現性や予測可能性について調査する。

4. 研究成果

(1) エンベロープ波形のインバージョン手法の確立

まず、Takeuchi (2016)に基づいた差分エンベロープの計算プログラムを作成し、そのプログラムと合成波形を用いた減衰・散乱構造復元テストを実施した。スカラー波の枠組みでは、差分エンベロープは次式(Takeuchi (2016)の(11)式)で表現できる:

$$\delta W = \left[-\int_l 2(\delta\varepsilon/\varepsilon)g_0 dl + \sum_i 2(\delta\varepsilon(x_i)/\varepsilon(x_i)) - \int_l k_0 \delta Q^{-1} dl \right] \exp\left(-k_0 \int_l Q^{-1} dl\right) W_0$$

この式はモンテカルロ法(例えばYoshimoto, 2000)を用いた実装が容易であり、複雑な速度構造の影響も加味したエンベロープ計算が実行できる。本研究では、日本列島の標準的な1次元速度

構造である JMA2001(上野・他, 2002)を使用した。このプログラムと西日本で発生した約 400 個の地震を用いて、西日本地域における 3 次元内部・散乱減衰構造を推定した。散乱構造の計算にあたっては、指数関数型のランダム媒質を仮定して相関距離を固定し、速度揺らぎの大きさのみを散乱パラメータとして扱う。構造推定にあたっては、西南日本で発生した約 400 個の地震を利用した。合成波形を用いた減衰構造復元テストの結果、震源放射エネルギーとサイト特性が既知であるという強い仮定が入っているが、作成したプログラムから減衰・散乱構造の分離推定が可能であることがわかった。実波形を用いて推定した結果を図 1 に示す。得られた構造の特徴は次の通りである：

- (1)1 層目(深さ 0-10km)の内部減衰及び散乱パラメータは、2 層目(10-30km)より大きい傾向がある。これは、地殻深部より浅部のほうが不均質の程度が強いことを示しており、3 次元空間における構造推定の必要性を示すものである。
- (2)九州地方は全体的に内部減衰及び地震波散乱の程度が他の地域より強い。これは、活動的な火山や活断層の存在といった九州地方のテクトニクスを強く反映しているものと考えられる。

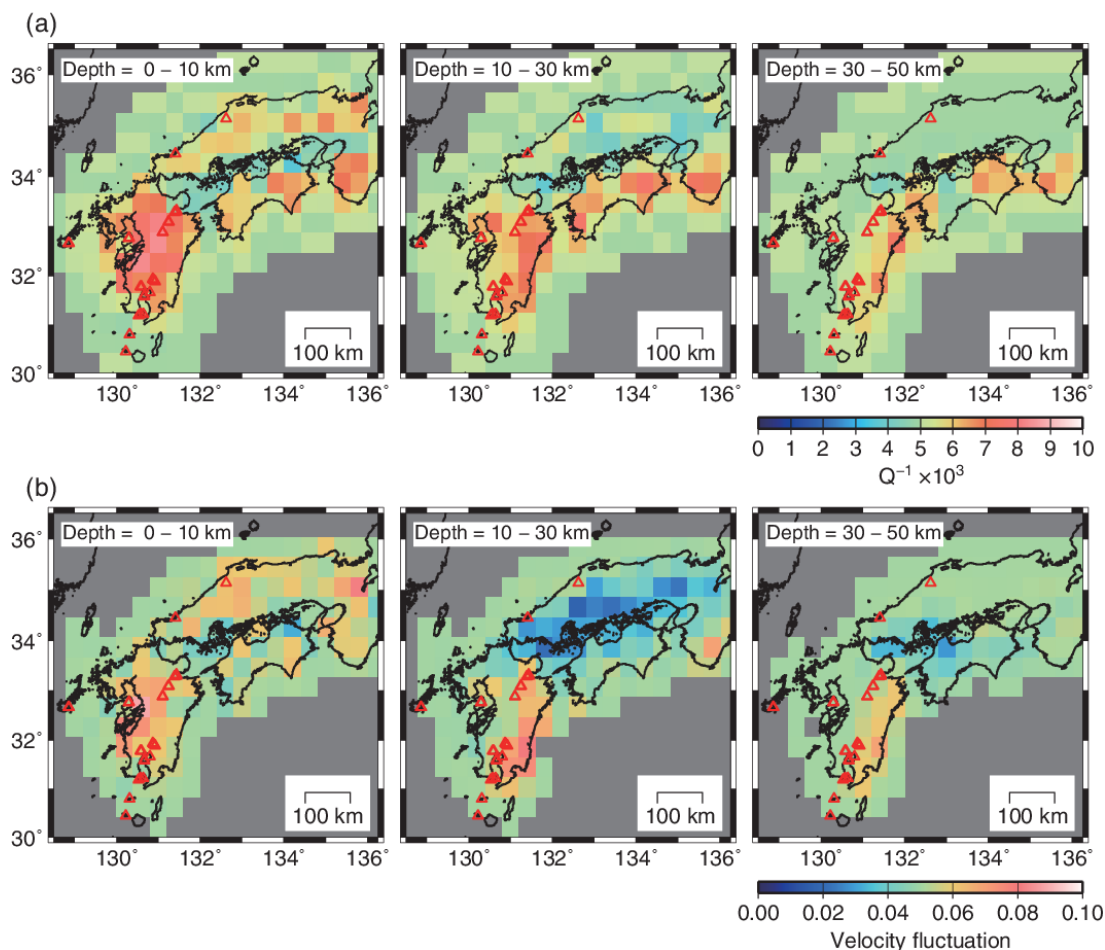


図 1 本研究で推定した西南日本の(a)内部減衰パラメータ、(b)散乱パラメータの 3 次元分布

次に、強震動即時予測への活用を目指して、Hoshiya and Aoki (2015)による地震動即時予測プログラムの枠組みにおいて内部減衰及び散乱パラメータの不均質分布を考慮できるような改修を実施した。また、Hoshiya and Aoki (2015)では等方散乱モデルに基づいていたが、非等方散乱モデルを取り扱えるような改修も同時に実施した。これらの改修によって Hoshiya and Aoki (2015)の枠組みに基づく地震動即時予測の精度がどの程度向上するか、2016 年熊本地震を対象としたシミュレーションを実施した。等方散乱の場合は Multiple Lapse Time Window 解析によって推定された内部減衰と散乱パラメータの 2 次元分布(Ogiso et al., 2018)を、非等方散乱の場合は図 1 に示した構造の 2 層目をそれぞれ不均質構造として採用した。予測変数としては計測震度を採用した。

図 2 に、九州内の観測点における計測震度の観測エンベロップと、20 秒後予測の場合の等方・非等方散乱、均質・不均質構造の計 4 種のシミュレーションによる予測エンベロップの比較を示す。等方散乱モデルでは、後続波(コーダ波)部分の予測が過大になる傾向がみられるが、非等方散乱モデルを導入することでその傾向が改善されることがわかる。そして、不均質構造を導入した結果がさらに観測エンベロップに近い予測となることがわかった。不均質構造を導入したことによる予測精度の改善度合いは、最大値の比較では 2 乗平均誤差で約 10%程度、震度エンベロ

ープ全体では約5~10%程度であった(図3)。しかし、改善度合いは等方散乱モデルと非等方散乱モデルで若干の違いがみられ、等方散乱モデルでは猶予時間が長い予測ほど不均質構造による改善度合いが大きかったのに比べて、非等方散乱モデルでは猶予時間が長い場合と短い場合で等方散乱モデルの場合ほど大きく改善しなかった。これは、不均質構造の推定手法の違いが寄与しているものと考えられる。等方散乱モデルの場合、そもそも推定した構造が2次元分布であり、2次元空間の波動伝播をシミュレーションとする Hoshiba and Aoki (2015)の方法との整合性が高かったものと考えられる。一方、本研究では3次元の不均質構造を推定したうえで、その2層目の構造を2次元不均質構造として取り扱った。実際の3次元空間における波動伝播と Hoshiba and Aoki (2015)に基づく2次元波動伝播の違いを考慮すると、猶予時間が短い予測の場合は浅部の減衰構造が大きく影響し、長い予測の場合は深部の減衰構造が影響するものと考えられる。本研究では減衰構造として深部の不均質構造を採用したため、猶予時間が短い場合の予測精度の改善の度合いが小さくなった可能性がある。すなわち、Hoshiba and Aoki (2015)の枠組みにおける3次元空間の波動伝播モデルの重要性が示唆される結果となったが、これは今後の課題としたい。

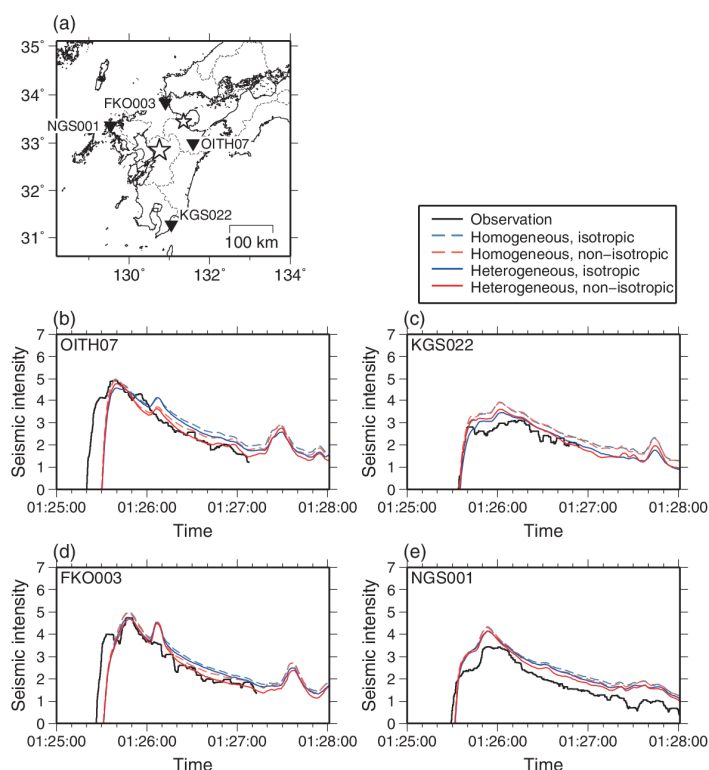


図2 九州地方の4観測点における計測震度の観測エンベロープ(黒実線)と4種類のシミュレーションによる予測エンベロープ(赤実線・破線、青実線・破線)の比較・星印は2016年4月16日1時25分に発生した地震(Mw7.0)の震央を示す。

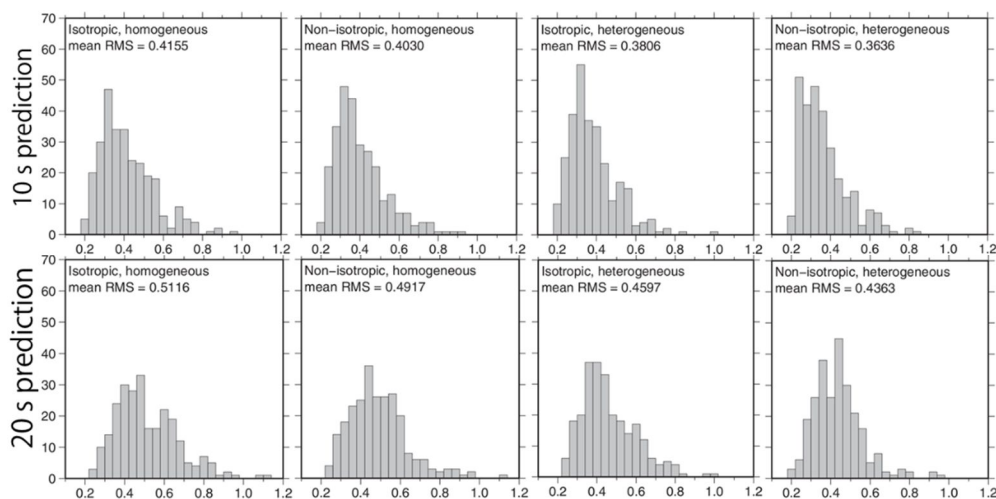


図3 10秒後予測(上段)と20秒後予測(下段)における、全エンベロープの予測残差のRMS値のヒストグラム。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ogiso Masashi, Hoshiba Mitsuyuki, Shito Azusa, Matsumoto Satoshi	4. 巻 108(6)
2. 論文標題 Numerical Shake Prediction for Earthquake Early Warning Incorporating Heterogeneous Attenuation Structure: The Case of the 2016 Kumamoto Earthquake	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bulletin of the Seismological Society of America	6. 最初と最後の頁 3457-3468
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1785/0120180063	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 Ogiso Masashi	4. 巻 216
2. 論文標題 A method for mapping intrinsic attenuation factors and scattering coefficients of S waves in 3-D space and its application in southwestern Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 948 ~ 957
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggy468	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15件（うち招待講演 1件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Masashi Ogiso
2. 発表標題 Estimation of source radiation amplitude from seismic coda waves considering the heterogeneous seismic structure
3. 学会等名 JpGU meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小木曾 仁
2. 発表標題 不均質な地下構造の影響を考慮した地震波エンベロープを利用した震源放射エネルギーの推定
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masashi Ogiso
2. 発表標題 Estimation of source radiation amplitude from seismic coda waves considering the heterogeneous seismic structure
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小木曾 仁
2. 発表標題 地震波エンベロープ全体の即時予測：「揺れの数値予報」への前方散乱モデルの導入
3. 学会等名 日本地震工学会・大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ogiso, M.
2. 発表標題 Full seismogram envelope prediction in the earthquake early warning: implementation of a forward scattering model in the Numerical Shake Prediction scheme
3. 学会等名 AGU Fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ogiso, M.
2. 発表標題 Introduction of a forward scattering model into the Numerical Shake Prediction Scheme: the 2016 Kumamoto earthquake
3. 学会等名 4th International Conference on Earthquake Early Warning (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小木曾 仁
2. 発表標題 前方散乱モデルを導入した「揺れの数値予報」：2016年熊本地震の例
3. 学会等名 日本地震学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小木曾 仁
2. 発表標題 「揺れの数値予報」への前方散乱モデルの導入
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 小木曾 仁
2. 発表標題 地震波エンベロープを用いた西南日本の内部減衰と散乱減衰の3次元構造推定
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ogiso, M.
2. 発表標題 Estimating 3D heterogeneous distribution of intrinsic attenuation and strength of random velocity fluctuation: method and application to the southwestern part of Japan
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小木曾 仁
2. 発表標題 “揺れの数値予報”における前方散乱効果の導入
3. 学会等名 研究集会「地震動のリアルタイム解析：防災・減災に向けた即時的な活用を目指して」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小木曾 仁
2. 発表標題 内部減衰と散乱減衰の3次元不均質構造推定：手法と西南日本への適用
3. 学会等名 第15回地震工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小木曾 仁
2. 発表標題 多重散乱の効果を考慮した内部減衰・散乱減衰の同時インバージョンの試み (2)
3. 学会等名 日本地震学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小木曾 仁
2. 発表標題 内部減衰と速度揺らぎの3次元不均質構造推定の試み
3. 学会等名 研究集会「広帯域波動現象とその時間変化の実態解明」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小木曾 仁
2. 発表標題 多重散乱の効果を考慮した内部減衰・散乱減衰の3次元構造推定の試み:西南日本への適用
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

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------