

# 地震波エネルギー場のモデル化による地殻内部の短波長不均質パラメータの推定

課題責任者

古村 孝志 東京大学 地震研究所

著者

江本 賢太郎 東北大学 理学研究科

齊藤 竜彦 防災科学技術研究所

汐見 勝彦 防災科学技術研究所

地殻内部には10km以下の短波長不均質構造が存在し、特に周期1秒以下の短周期地震波は強い影響を受け複雑な波形となることがよく知られている。高密度な地震観測網の解析により、周期が数秒から10秒といった長周期帯においても、短波長不均質構造に起因する散乱の影響により、震源付近に地震波エネルギーが停滞する様子が確認された。この周期帯であれば、地震波伝播の3次元差分法シミュレーションにより、広範囲の波形を計算することが可能であるため、観測される地震波エネルギーをモデル化することで、地殻内部の短波長不均質構造を推定した。地震波エネルギーは、短波長不均質による散乱効果の他に、非弾性効果による内部減衰の影響も受ける。Hi-net高感度地震観測網の多観測点を用いた地震波エネルギーの空間分布に着目することで、2つの影響を分離して推定することに成功した。短波長不均質の特徴的スケールは3.2km、ゆらぎのRMS値は5%と推定された。この結果は短周期地震波を用いた従来の研究と調和的であったが、特徴的スケールに相当する波長の帯域で直接推定したのは本研究が初めてである。

キーワード：短波長速度不均質, 差分法計算, 地震波散乱, 内部減衰, 地震波エネルギー

## 1. はじめに

地球内部の地震波速度不均質構造は、トモグラフィーに代表されるような決定論的手法により明らかにされてきた。分解能は対象により異なるが、日本列島スケールではHi-net高感度地震観測網により、その観測点間隔約20km程度の構造は推定されている（例えば、Matsubara et al., 2017 [1]）。一方で、それよりも細かい数km以下のスケールの不均質構造は統計的にモデル化されてきた（詳細は、Sato et al., 2012 [2]）。統計的なモデル化では、ランダムにゆらぐ不均質を考え、特徴的スケールやゆらぎの強さ、つまりゆらぎのスペクトル構造を推定することを目的としている。特に波長の短い短周期地震波は、微細な不均質（短波長不均質）の影響を強く受ける。このため、従来は周期1秒以下の短周期地震波を用いたゆらぎ

のスペクトル構造の推定が行われてきた。それより長周期では、短波長不均質を考慮しない解析が一般的であるが、地震波の後半部分（コーダ）には短波長不均質の影響が現れる。図1は、広島県北部で発生した地震の周期4-8秒における地震波エネルギーの空間分布である。直達波より震源側（コーダ部分）では空間一様のエネルギー分布となっている。これは短波長不均質の影響による散乱波が震源付近に停滞しているためである。この現象は短周期地震波ではよく知られている（Aki, 1969 [3]; Sato et al., 2012 [2]）。本研究では、3次元差分法計算による地震波伝播シミュレーションにより、観測されるエネルギー分布を再現することで、短波長不均質のスペクトル構造を推定する。

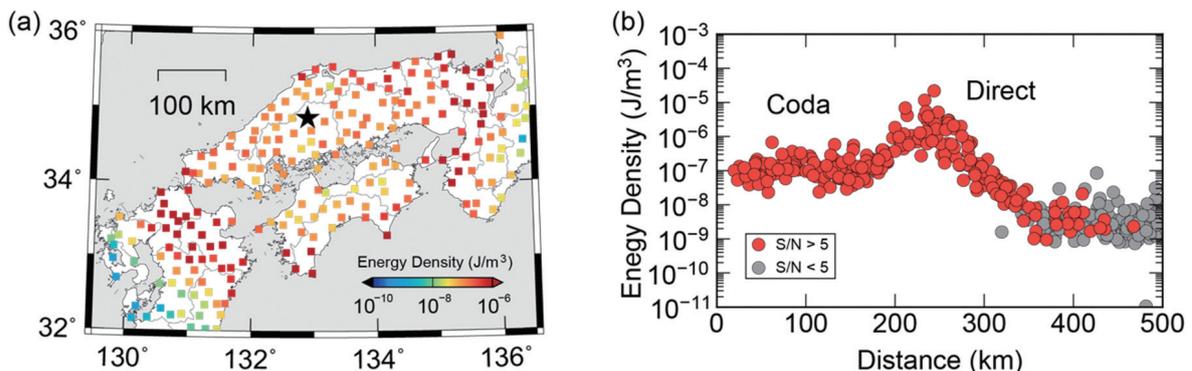


図1 Hi-netで捉えた地震波エネルギー密度の空間分布（周期4-8秒、経過時間80秒）。(a)各観測におけるエネルギー密度。四角がHi-net観測点を表す。(b)エネルギー密度の伝播距離依存性。赤色・灰色の丸はそれぞれ、S/Nが5より上・下を表す。

## 2. データ

従来の短周期を用いた解析（例えば、Carcolé & Sato, 2010 [4]）により、短波長不均質が比較的一様に分布していると推定されている西南日本を対象とし、広島県北部で発生したマグニチュード 4.3、4.9、5.2 の3つの地震を解析する。データは震央距離が 500km 以内の Hi-net 高感度観測網（Okada et al., 2004 [5]; Obara et al., 2005 [6]）の観測点で記録された速度波形記録を用いる。解析対象は周期 8-16 秒、4-8 秒、2-4 秒であるが、Hi-net 観測点の地震計は短周期地震計であるため、Maeda et al. (2011)[7] の手法を用いて広帯域化する。地震波のエネルギー密度は 3 成分速度波形の二乗和に密度をかけて定義する。

## 3. パラメータ推定

### 3.1 3次元波動伝播シミュレーション

西南日本における波動場をモデル化するため、水平方向に 1536km、深さ方向に 512km の領域を計算する。コード部分まで精度よく計算する必要があるため、広い範囲を用いて境界の影響がない部分のみを用いる。空間は水平・鉛直方向ともに 1km 刻み、時間は 0.02 秒刻みと設定し、空間 4 次・時間 2 次精度のスタaggerドグリッドを用いた弾性波の差分法計算により、地震波動伝播をシミュレーションする。効率的に計算するために、鉛直方向に媒質を分割し、MPI 並列化したコードを用いる（例えば、Furumura & Chen, 2004 [8]）。大局的な速度構造として、F-net 広帯域地震観測網のメカニズム解推定で用いられている 1 次元速度構造 (Kubo et al., 2002 [9]) を仮定する。この地殻部分にランダムな 3 次元短波長不均質を重畳させる。

### 3.2 短波長不均質の推定

地震波エネルギーは伝播過程において短波長不均質による散乱減衰と、非弾性効果による内部減衰の影響を受ける。これらの影響を分離して評価するために、本研究ではエネルギー比に着目した解析手法を提案する。ある経過時間において、エネルギー密度の空間分布を作成し、震源付近のみ積分したエネルギーと空間全体で積分した

エネルギーの比を計算する。内部減衰の影響は伝播時間に依存しているため、同一の経過時間で計算するエネルギー比では、その影響をほぼキャンセルすることが可能であり、短波長不均質の影響のみを評価することができる。各周期帯において、エネルギー比の時間発展を 3 次元差分法シミュレーションでモデル化することで短波長不均質の特徴的スケールとゆらぎの強さをグリッドサーチにより推定する。3つの地震記録のそれぞれの周期帯で求めた最適解を用いて計算した速度ゆらぎのパワースペクトル密度を図 2a に示す。従来の短周期地震波の解析から推定された結果も一緒に示しており、本研究の結果は従来の結果から外挿されるものと調和的である。本研究の解析範囲はパワースペクトルの折れ曲り（特徴的スケールの逆数）が存在すると考えられている範囲をカバーしており、外挿ではなく直接推定したのは初めてである。この周期帯は、P 波や S 波といった実体波と表面波が両方含まれており、単純な仮定をおいた理論手法では再現することが難しく、従来は解析対象とされてこなかった。差分法シミュレーションでは、そのような仮定をする必要がないため、適切な推定が可能である。

### 3.3 内部減衰の推定

前節で求めた短波長不均質の最適解を仮定し、内部減衰のパラメータを変えたシミュレーションを行う。観測エネルギーの絶対値の時間発展を説明する適切な内部減衰を推定する。周期 8-16 秒、4-8 秒では、内部減衰の影響が弱く、下限をうまく定めることができなかった。既往研究との比較を図 2b に示すが、本研究の結果は、表面波を用いて推定した、安定な地域における上部地殻における推定例 (Mitchell, 1995 [10]) に近く、本研究で解析した波は表面波が支配的であったと言える。

### 3.4 エネルギー場のモデル化

3.2、3.3 節で求めた、短波長不均質と内部減衰のパラメータを用いてシミュレーションした、周期 4-8 秒における計算エネルギー場と観測されたエネルギー場の比較を図 3 に示す。直達波のエネルギーレベルや、震源付近で停滞

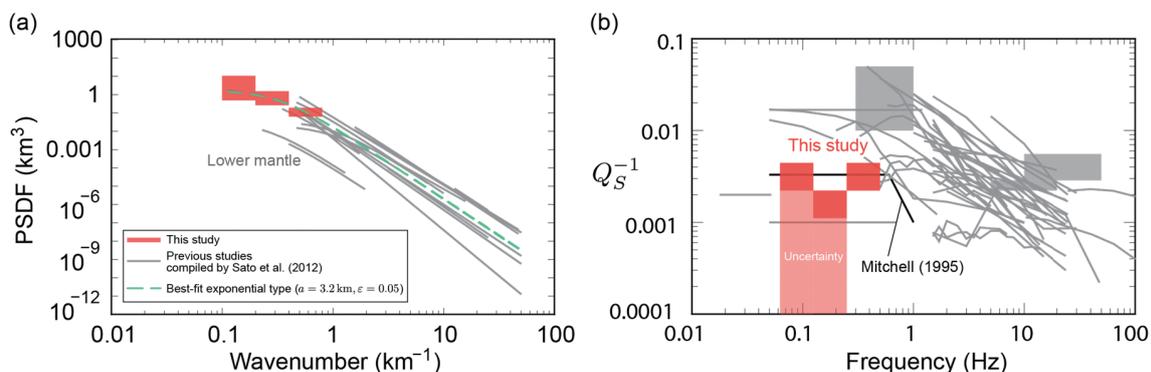


図 2 (a) 本研究で推定された短波長不均質のパワースペクトル密度（赤色）と既往研究（灰色）との比較。緑色の破線は、すべての推定結果にフィッティングした最適な指数関数型ランダム不均質を表す。(b) 本研究で推定した内部減衰（赤色）と既往研究（灰色）との比較。 $Q_s^{-1}$  は地震波 1 サイクルでの内部減衰の強さを表す指標である。既往研究は Sato et al. (2012)[2] でまとめられたものである。

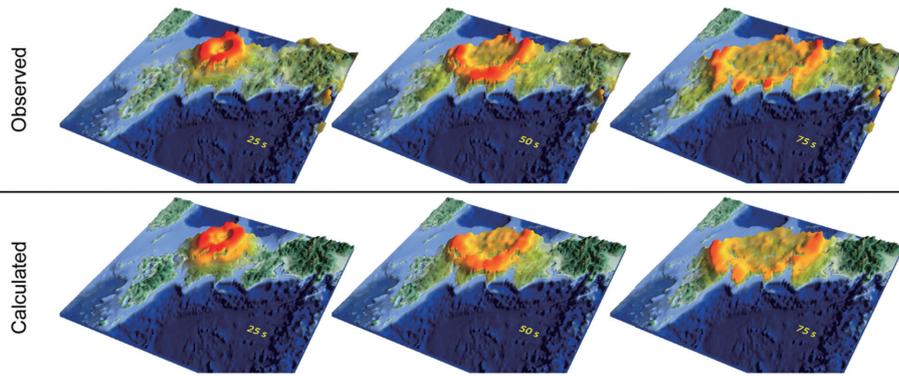


図3 推定した最適解を用いてシミュレーションしたエネルギー密度（下段）と観測（上段）の比較。左から経過時間25秒、50秒、75秒でのエネルギー密度場のスナップショットである。

するコーダ波のエネルギーがよく再現されていることがわかる。

#### 4. 結論

西南日本で発生した地震を対象として、地震波エネルギーの時空間分布をモデル化することで、短波長不均質のパワースペクトルと、内部減衰パラメータの推定を行った。従来の短波長不均質構造推定に比べると長周期帯（2-16秒）を解析した。この周期帯では実体波や表面波が含まれているため、理論手法ではモデル化が難しいが、3次元差分法シミュレーションにより適切に計算することができた。本研究は、高密度で観測点が設置されているHi-netの特徴を生かし、エネルギー場の空間分布を利用する点が従来の手法と異なる新しい部分である。空間分布の震源付近と全体のエネルギー比を指標とすることで、短波長不均質と内部減衰を分離して推定した。短波長不均質のパワースペクトルは従来の短周期地震波解析の結果を外挿したものと調和的であるが、パワースペクトルのコーナー波数付近を直接推定した例は本研究が初めてである。内部減衰は、表面波を用いた既往研究の推定結果と調和的であった。

#### 謝辞

本研究では、防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-netによる観測データを使用しました。地震波動伝播シミュレーションには海洋研究開発機構が運用する地球シミュレータを使用しました。本研究成果は、Emoto et al. (2017)[11]として出版されました。

#### 文献

- [1] Matsubara, M., H. Sato, T. Ishiyama, and A. Van Horne, “Configuration of the Moho discontinuity beneath the Japanese Islands derived from three-dimensional seismic tomography”, *Tectonophysics*, vol.710-711, pp.97-107, doi: 10.1016/j.tecto.2016.11.025, 2017.
- [2] Sato, H., M. Fehler, and T. Maeda, *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth*, 2nd edn, Springer, 2012.
- [3] Aki, K., “Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves”, *J. geophys. Res.*, vol.74, no.2, pp.615–631, 1969.
- [4] Carcolé, E. and H. Sato, “Spatial distribution of scattering loss and intrinsic absorption of short - period S waves in the lithosphere of Japan on the basis of the Multiple Lapse Time Window Analysis of Hi - net data”, *Geophys. J. Int.*, vol.180, pp.268-290, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04394.x, 2010.
- [5] Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara, and A. Yamamoto, “Recent progress of seismic observation network in Japan -Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net-”, *Earth Planets Space*, vol.56, pp.xv–xviii, 2004.
- [6] Obara, K., K. Kasahara, S. Hori, and Y. Okada, “A densely distributed high-sensitivity seismograph network in Japan: Hi-net by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol.76, pp.021301, doi:10.1063/1.1854197, 2005.
- [7] Maeda, T., K. Obara, T. Furumura, and T. Saito, “Interference of long- period seismic wavefield observed by the dense Hi-net array in Japan”, *J. geophys. Res.*, vol.116, pp.B10303, doi:10.1029/2011JB008464, 2011.
- [8] Furumura, T., and L. Chen, “Large scale parallel simulation and visualization of 3D seismic wavefield using the Earth Simulator”, *Comput. Model. Eng. Sci.*, vol.6, pp.153–168, 2004.
- [9] Kubo, A., E. Fukuyama, H. Kawai, and K. Nonomura, “NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: quality test and application”, *Tectonophysics*, vol.356, pp.23–48, 2002.
- [10] Mitchell, B., “Anelastic structure and evolution of the continental crust and upper mantle from seismic surface wave attenuation”, *Rev. Geophys.*, vol.33, pp.441–462, 1995.
- [11] Emoto, K., T. Saito, and K. Shiomi, “Statistical parameters of random heterogeneity estimated by analysing coda waves based on finite difference method”, *Geophys. J. Int.*, vol.211, pp.1575-1584, 2017.

# Estimation of Statistical Parameters of Small-Scale Heterogeneities in the Crust by Analyzing the Spatial Variation of Seismic Wave Energy Field

Project Representative

Takashi Furumura Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Authors

Kentaro Emoto Graduate School of Science, Tohoku University

Tatsuhiko Saito National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

Katsuhiko Shiomi National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

Short-period ( $< 1$ s) seismograms are strongly affected by small-scale ( $< 10$ km) heterogeneities in the crust. We found that the latter part of long-period ( $> 10$ s) seismograms are also affected by small-scale heterogeneities. We modeled observed seismic energy field by the 3-D finite difference simulation of the seismic wave propagation. The observed seismic energy is affected by both the intrinsic attenuation due to the anelasticity of the medium and the scattering attenuation due to the small-scale heterogeneity. We focus on the spatial variation of the energy field revealed by the Hi-net and separately estimate the effects of the intrinsic and scattering attenuations. The best-fit characteristic scale and the RMS fractional fluctuation of the small-scale heterogeneity are 3.2km and 5%, respectively. This result is consistent with previous studies. Different from previous studies, we estimate parameters of the small-scale heterogeneity by using seismograms whose wavelengths are comparable to the characteristic scale of the heterogeneity.

**Keywords:** Numerical modelling, Wave propagation, Wave scattering and diffraction

## 1. Introduction

The structure of the seismic wave velocity in the Earth has been estimated by deterministic methods as typified by the seismic wave tomography. Although the resolution depends on the target scale, the velocity structure in Japan is estimated at the resolution of 20km (e.g. Matsubara et al., 2017 [1]) corresponding to the station separation of Hi-net (High Sensitivity Seismograph Network Japan) (Okada et al., 2004 [2]; Obara et al., 2005 [3]). On the other hand, small-scale heterogeneities smaller than the resolution of the deterministic method have been statistically modeled (see Sato et al., 2012 [4]). In the statistical method, we consider the random small-scale fluctuation and discuss the characteristic scale and the strength of the fluctuation. These parameters characterize the spectrum of small-scale heterogeneities. We usually analyze short-period ( $< 1$ s) seismograms to estimate the spectrum, since short-period seismic waves are strongly affected by small-scale heterogeneities. Conversely, we do not take into account small-scale heterogeneities when we analyze long-period ( $> 2$ s) seismograms. However, we find that the latter part (coda) of long-period seismograms are affected by small-scale heterogeneities. In this study, we model this characteristic of the energy field of long-period seismic waves by using the 3-D finite difference simulation of the seismic wave propagation and estimate the power spectrum of small-scale heterogeneities in the crust.

## 2. Data

We analyze three earthquakes whose magnitudes are 4.3, 4.9 and 5.2, occurred in southwestern Japan. The small-scale heterogeneity in southwestern Japan is relatively uniform compared to other regions in Japan (Carcolé & Sato, 2010 [5]). We analyze three period ranges: 8-16s, 4-8s and 2-4s. The energy density is defined as the sum of squared velocity seismograms of three components, multiplied by the mass density.

## 3. Estimation of Medium Parameters

### 3.1 3-D Simulation of the Seismic Wave Propagation

The calculation volume is 1536km in the horizontal directions and 512km in depth. This volume is large enough to model the coda waves without the effect of the boundary. The grid interval is 1km and the time interval is 0.02s. We conduct the 3-D simulation of the elastic wave propagation by using the staggered-grid finite difference scheme with the accuracy of fourth order in space and second order in time. We adopt the MPI parallel computation for efficient calculations (e.g. Furumura & Chen, 2004 [6]). We assume the 1-D background velocity structure (Kubo et al., 2002 [7]) and superimpose the 3-D random fluctuation in the crust.

### 3.2 Estimation of the Small-Scale Heterogeneity

We calculate the spatial integral of the energy density around the source area (coda) and that over the entire area, separately and take the ratio of them. By taking the ratio, the effect of the intrinsic attenuation can be canceled. We estimate the characteristic scale and the strength of the fluctuation of small-scale heterogeneity by modeling the energy ratio. We show the estimated power spectrum in Fig. 1a. Our result is consistent with the extrapolated value of previous studies. Our analyzed wavenumber range covers the corner wavenumber of the power spectrum. In this frequency range, the seismogram consists of the body and the surface waves. It is hard to analyze such complex seismograms by using the theoretical method with many assumptions. In the finite difference simulation, strong assumptions are not necessary.

### 3.3 Estimation of the Intrinsic Attenuation

We estimate the intrinsic attenuation parameter by using the best-fit scattering parameters estimated in the previous section. We search the best-fit parameter of the intrinsic attenuation by modeling the attenuation of the absolute value of the observed energy. We show the comparison of our estimated intrinsic attenuation parameter and those of previous studies in Fig. 1b. Our result is close to the result in the stable upper crust obtained by the analysis of the Rayleigh wave (Mitchell, 1995 [8]). Surface waves might be dominant at the period band which we analyzed.

### 3.4 Modeling of the Seismic Wave Energy Field

We show the seismic wave energy field calculated by using the estimated scattering and intrinsic attenuations at the period band of 4-8s in Fig. 2. The simulated energy field correctly models the observed one.

## 4. Conclusion

We estimate statistical parameters of small-scale heterogeneities and the intrinsic attenuation in the crust by modeling the spatiotemporal variation of the seismic wave energy. We conduct the 3-D finite difference simulations of the seismic wave propagation to correctly model the complex energy field. By using the dense seismic network Hi-net, we analyze the spatial distribution of energy density. We separately estimate the scattering and the intrinsic effects by using the ratio of the energy densities of the coda area to that of the entire area. The best-fit spectrum of small-scale heterogeneities is consistent with those of previous studies. This study is the first to estimate the spectrum by using the waves whose wavenumbers correspond to the characteristic scale of the heterogeneity.

## Acknowledgement

We used Hi-net data provided by National Research Institute for Earth Science and Disaster. Computations were conducted on the Earth Simulator at the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. This study was published as Emoto et al. (2017)[9].

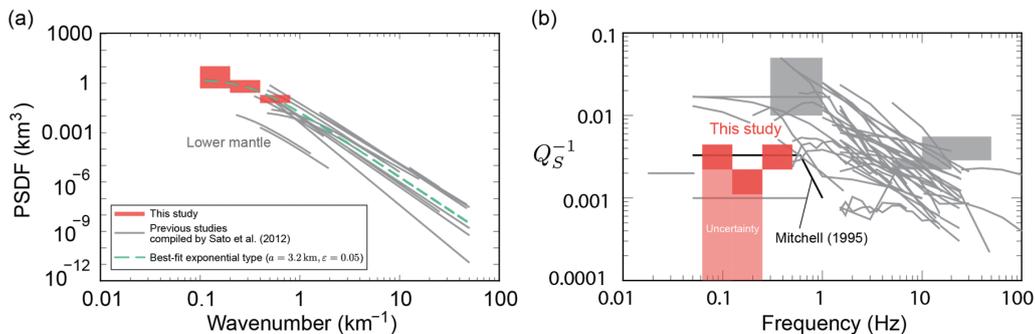


Fig. 1 Comparison of estimated (a) power spectrum density function and (b) intrinsic attenuation of this study and those of previous studies. Results of previous studies are compiled by Sato et al. (2012)[4].

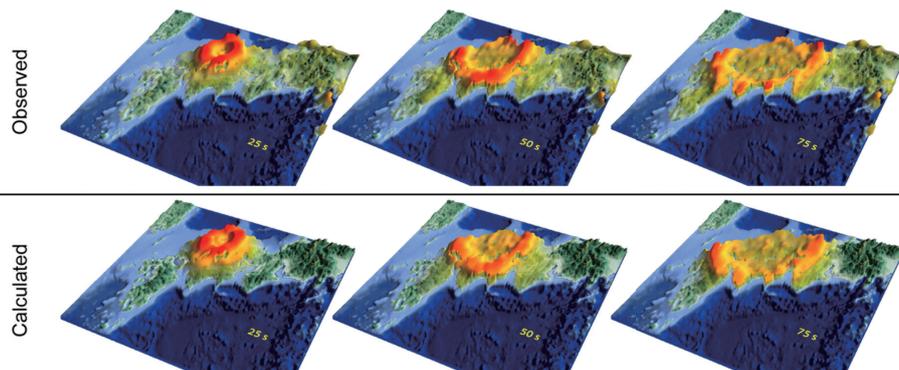


Fig. 2 Comparison of observed (upper) and calculated (lower) energy densities at the period band of 4-8s.

## References

- [1] Matsubara, M., H. Sato, T. Ishiyama, and A. Van Horne, “Configuration of the Moho discontinuity beneath the Japanese Islands derived from three-dimensional seismic tomography”, *Tectonophysics*, vol.710-711, pp.97-107, doi: 10.1016/j.tecto.2016.11.025, 2017.
- [2] Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara, and A. Yamamoto, “Recent progress of seismic observation network in Japan -Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net-”, *Earth Planets Space*, vol.56, pp.xv-xviii, 2004.
- [3] Obara, K., K. Kasahara, S. Hori, and Y. Okada, “A densely distributed high-sensitivity seismograph network in Japan: Hi-net by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol.76, pp.021301, doi:10.1063/1.1854197, 2005.
- [4] Sato, H., M. Fehler, and T. Maeda, *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth*, 2nd edn, Springer, 2012.
- [5] Carcolé, E. and H. Sato, “Spatial distribution of scattering loss and intrinsic absorption of short-period S waves in the lithosphere of Japan on the basis of the Multiple Lapse Time Window Analysis of Hi-net data”, *Geophys. J. Int.*, vol.180, pp.268-290, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04394.x, 2010.
- [6] Furumura, T., and L. Chen, “Large scale parallel simulation and visualization of 3D seismic wavefield using the Earth Simulator”, *Comput. Model. Eng. Sci.*, vol.6, pp.153-168, 2004.
- [7] Kubo, A., E. Fukuyama, H. Kawai, and K. Nonomura, “NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: quality test and application”, *Tectonophysics*, vol.356, pp.23-48, 2002.
- [8] Mitchell, B., “Anelastic structure and evolution of the continental crust and upper mantle from seismic surface wave attenuation”, *Rev. Geophys.*, vol.33, pp.441-462, 1995.
- [9] Emoto, K., T. Saito, and K. Shiomi, “Statistical parameters of random heterogeneity estimated by analysing coda waves based on finite difference method”, *Geophys. J. Int.*, vol.211, pp.1575-1584, 2017.