

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009-2011

課題番号：21540426

研究課題名（和文） 不均質構造による散乱と短周期地震波エンベロープの研究

研究課題名（英文） Study on scattering and seismic-wave envelopes in short-periods in the heterogeneous medium

研究代表者

佐藤 春夫 (Sato, Haruo)

東北大学大学院理学研究科・教授

研究者番号：80225987

研究成果の概要（和文）：固体地球の不均質構造の解明は、地球形成を考える上で重要な課題である。固体地球の不均質構造の波長スペクトルはかなり幅広いと考えられるため、地震波の波長と同程度の尺度の不均質の検出には散乱の効果を計測することが必須である。本研究は、不均質構造における地震波動伝播の数理的モデルの構築と、観測される短周期地震波の解析に基づくランダムな不均質構造の解明を目的とする。以下に、本研究の成果を列挙する。(1)マルコフ近似に基づき、層構造を持つランダム弾性媒質の自由表面上における短周期ベクトル波形エンベロープの理論合成法を構築した。(2)微小地震のS波エンベロープを解析し、東北地方下のランダム不均質のパワースペクトル密度を求めたところ、速度不均質は特に第四紀火山の下で大きいことが明らかになった。(3)多重等方散乱モデルに基づいてHi-netによる微小地震の波形エンベロープを解析し、日本全土の散乱減衰と内部減衰の分布図を作成した。(4)浅間山における爆破地震動エネルギーの空間分布の時間変化から、10Hz前後での平均自由行程が1km程度であることを明らかにした。これは、通常のリソスフェアのそれよりも二桁近く強い散乱を意味する。(5)雑微動源がランダム一様に分布している場合、雑微動の相互相関解析から散乱媒質におけるグリーン関数を抽出することができることを一次散乱近似に基づいて証明した。多重散乱を考慮した場合にはグリーン関数抽出と光学定理が等価であることを証明した。(6)短周期地震波の伝播特性と波形解析に基づく固体地球のランダムな不均質構造の推定に関して、各種の観測事実と数理的手法を取りまとめた書籍を上梓した。

研究成果の概要（英文）：It is important to clarify the medium heterogeneity of the solid earth for the study of the evolution process of the earth. The spectra of the velocity inhomogeneity can be considered to be very broad; therefore, measurements of scattering process is necessary for the study of inhomogeneity having the same scale of the wavelength of seismic waves. We put a focus on the mathematical bases of the wave propagation through random media and the measurement of the earth medium heterogeneity from the characteristics of observed seismic waves in short periods. We enumerate the obtained results as follows: (1) We successfully formulated the synthesis of vector-wave envelopes in short periods on the surface of layered random media according to the Markov approximation. (2) We estimated random velocity inhomogeneities beneath Tohoku, Honshu, Japan from the envelope analysis of S-waves of small earthquakes, where the velocity inhomogeneity is strong especially beneath Quaternary volcanoes. (3) From the analysis of S-seismogram envelopes of local earthquakes registered by Hi-net on the basis of the multiple isotropic scattering model, we clarified the regional variation of scattering loss and intrinsic absorption of S-waves in Japan. (4) From the analysis of explosion seismograms according to the radiative transfer theory, we estimated the mean free path beneath Asamo volcano to be as small as 1 km at 10 Hz, which is two order stronger than that in the lithosphere. (5) By using the Born approximation, we proved the Green function retrieval from the noise cross correlation function for a scattering medium. Then we proved the equivalence of the Green function retrieval and the generalized optical theorem for a scattering medium when the distribution of

noise sources is random and uniform in space. (6) We published a textbook which compiles the characteristics of observed seismic waves in short periods and mathematical theories on scattering of waves in the randomly heterogeneous earth medium.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地震波，不均質構造，散乱，島弧，地殻，リソスフェア，マントル，波動

1. 研究開始当初の背景

固体地球のマントルの不均質構造の解明は、惑星の一つとしての地球形成を考える上で重要であり、特にリソスフェアの不均質構造の解明はテクトニクスの形成史を考える上からも必須である。これまで、固体地球の速度不均質構造は走時データの解析に基づくトモグラフィによって詳細に調べられ、大きな成果を上げてきた。この方法は幾何光学近似による波線理論に基づいており、この弱点を補うように回折効果の補正も行われるようになってきた。しかし実際の不均質構造は幅広い波長帯に渡って広がっており、ランダム性も強いことが知られるようになってきた。特に地震波の波長と不均質の尺度が同程度の場合には、散乱の効果が著しく大きくなるのが波動論から予測される。実際、短周期（特に1 s以下）の観測波形には、散乱によるコーダ波の励起が著しく現れており、直達波のエンベロープの見かけ継続時間はマグニチュードから予測される震源継続時間よりもかなり長いことがわかっている。これらの現象は、従来の層構造（球殻構造）地球モデルでは説明が出来ず、短波長のランダム不均質構造を重畳したモデルを考えなければならないことを強く示唆している。

2. 研究の目的

固体地球の不均質構造の解明は、地球形成を考える上から重要な課題である。本研究は、固体地球の不均質構造における地震波動伝播の数理モデルの構築と、観測される短周期地震波エンベロープの解析に基づく不均質構造の

解明を目的とする。ランダム媒質における統計的波動論と現象論的な輻射伝達理論の関係を確立し、数値シミュレーションによりモデル化の精度を検証する。同時に、不均質構造におけるノイズの相互相関解析法の数理的基礎を明らかにする。また、地震波形エンベロープを解析し、上部マントルからリソスフェアの速度ゆらぎのスペクトルの特徴を抽出すると共に、近地震のデータ解析から散乱と減衰の地域的な分布図を作成する。求められた散乱と減衰の情報は、特に短周期強振動の定量的予測に重要な指針となる。

3. 研究の方法

地震波は震源ではパルス的であるが、固体地球のランダムな不均質弾性媒質の中を伝播するに従ってそのエンベロープ幅は拡大し、直交成分が励起される。本研究では、エンベロープ幅拡大と直交成分の励起の周波数依存性をランダム媒質のスペクトルから予測する、統計的数理モデルを構築する。ランダム媒質をガウス型スペクトルからより現実的な冪乗型スペクトルへ拡張し、自由表面におけるベクトル波形エンベロープの導出を行い、波動方程式の差分シミュレーションによってモデルの数値的精度評価を実施する。背景速度が段階的に変化するような層構造ランダム媒質におけるベクトル波形エンベロープ形成モデルを確立する。また、ダブルカップル型震源に関するベクトルエンベロープの導出を行う。

稠密な近地震の短周期S波エンベロープデ

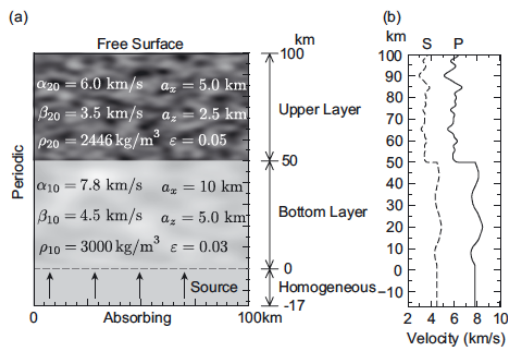
ータを多重等方散乱モデルに基づく **Multiple Lapse time window analysis** 法を用いて解析し、周波数帯ごとの S 波の散乱減衰（不均質の指標）と内部減衰（振動エネルギーから熱への変換の指標）を求め、日本列島をカバーする分布図を作成する。また、S 波エンベロープ形状の距離依存性を周波数帯ごとに計測する。また、遠地地震 P 波の解析に自由表面上のエンベロープ理論モデルを用いて、リソスフェアと上部マントルの不均質性を計測する。

不均質構造において、ノイズの相互相関解析からグリーン関数を導出するための条件を、散乱理論に基づいて考察し、明らかにする。

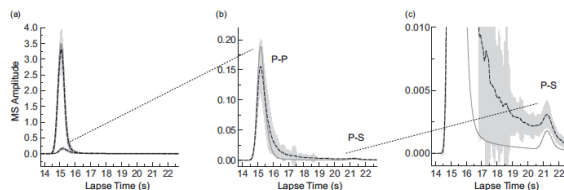
4. 研究成果

(1) ランダム不均質構造における波形エンベロープ導出の理論的研究

Emoto et al. [2010]は、ランダム媒質の自由表面におけるベクトル波エンベロープの導出に初めて成功した。P 波の鉛直入射の場合、上下動成分のみならず水平同成分についても、無限媒質の場合と比べて振幅は約 2 倍増幅されることが示され、数値解析からもその妥当性が確かめられた。さらに、より現実的な背景速度が段階的に変化するようなランダム構造において、マルコフ近似に基づく短周期地震波形エンベロープの理論合成を可能にした [Emoto et al. 2012].



ランダム不均質層構造 [Emoto et al. 2012]



ランダム不均質層構造におけるベクトル波エンベロープ [Emoto et al. 2012]

Sawazaki et al. [2010] は、ランダム媒質においてダブルカップル型震源から放射された短周期地震ベクトル波形のエンベロープの合成を行い、震源距離が大きくなるに従って震

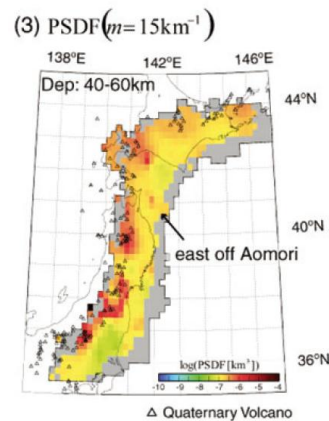
源輻射パターンが崩れていく様子を再現することに成功した。これらの研究は、リソフェアの不均質構造解析の数理的基盤となる。

Tripathi et al. [2010]は、東北地方で観測される浅い地震の S 波主要動の継続時間を解析し、火山フロントの東と西で顕著な違いがあることを明らかにした。見かけの継続時間は不均質の強さと減衰の大きさによって支配されている。この知見は、強震動の被害予測の精緻化に貢献する。

牡鹿半島において地震アレイ観測を実施し、2011 年東北地方太平洋地震の短周期地震波の輻射過程を明らかにした [Nakahara et al. 2011].

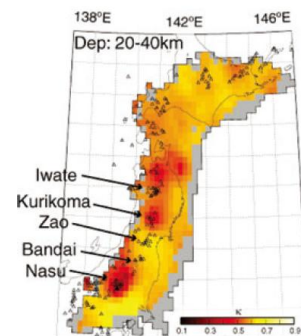
(2) 短周期地震波形の解析に基づくランダム不均質の推定

微小地震の S 波の拡大現象を解析し不均質構造のスペクトルを推定するインバージョン法を構築し、東北地方の不均質構造を明らかにした。特に、第四紀火山の下では不均質が強いことを明らかにした [Takahashi et al. 2009].



S 波エンベロープ解析に基づくランダム不均質のパワースペクトル密度 [Takahashi et al. 2009].

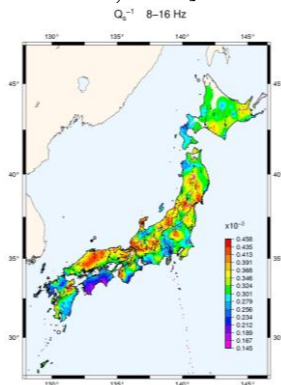
(1) κ



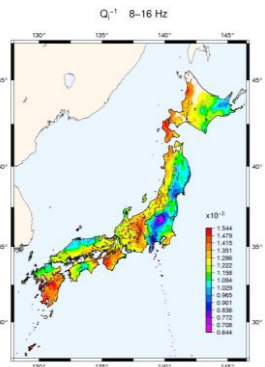
S 波エンベロープ解析に基づくランダム不均質のパワースペクトル密度の周波数勾配 [Takahashi et al. 2009].

多重等方散乱モデルに基づいて Hi-net によ

る地震 S 波エンベロープデータを解析し、日本全土の散乱減衰と内部減衰の分布図を作成した[Carcole and Sato, 2010].

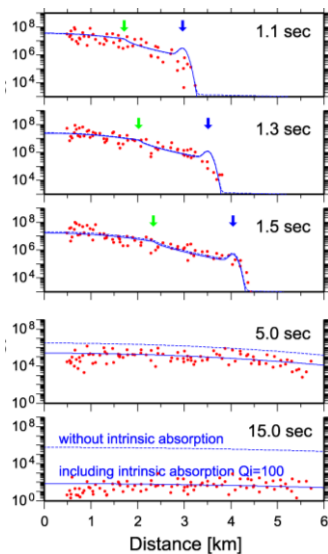


散乱減衰 [Carcole and Sato, 2010]



内部減衰 [Carcole and Sato, 2010]

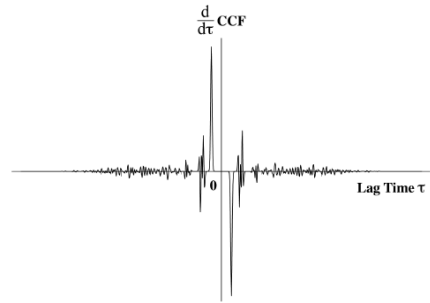
PS変換散乱の多重等方散乱モデルに基づいて浅間山における爆破地震動を解析し、活火山におけるS波の平均自由行程が10Hzで1 kmと短いことを明らかにした。これはリソスフェアの値よりも二桁近く強い散乱を意味する [Yamamoto and Sato, 2010].



浅間山における爆破地震動エネルギーの空間分布の時間変化 [Yamamoto and Sato, 2010]

(3) ノイズ相互相関関数から不均質構造におけるグリーン関数の導出

Sato [2010]は、雑微動の相互相関解析から散乱媒質におけるグリーン関数を抽出することができることを、一次 Born 近似に基づいて証明した。

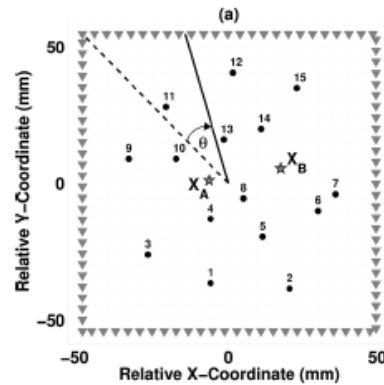


雑微動の相互相関解析から散乱媒質におけるグリーン関数の抽出 [Sato, 2009a, 2010]

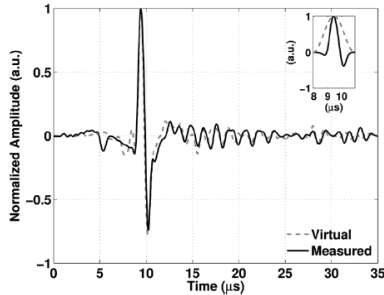
Margerin and Sato [2011a]はこれを拡張し、すべての高次散乱を考慮し、グリーン関数を抽出することと光学定理が成り立つことが等価であることを証明した。さらに、ベクトル弾性波動についても同様の関係を証明した [Margerin and Sato, 2011b].

多数の穴をあけたアルミブロックにおける超音波実験を行い、相互相関から2点間のグリーン関数がコーダ波部分までよく再現できることを実証した [Mikesell et al. 2011].

これらの研究は、雑微動の相互相関解析からコーダを持つ散乱媒質のグリーン関数抽出に数理的な保証を与える。



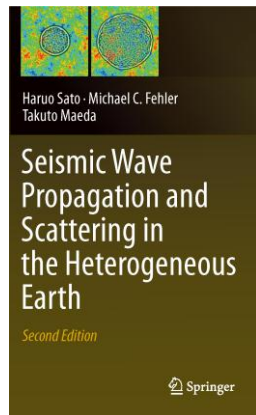
多数の穴をあけたアルミブロックを用いた相互相関法に基づくグリーン関数の再現実験 [Mikesell et al. 2012]



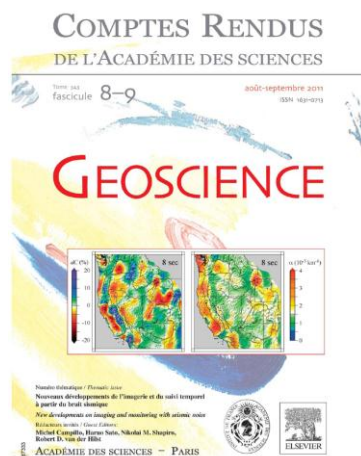
相互相関法に基づくグリーン関数の再現 [Mikesell et al. 2012]

(4) レビューワークの執筆と編纂

短周期地震波の伝播特性と、この解析に基づく固体地球のランダムな不均質構造の推定に関して、各種の観測事実と数理的手法を取りまとめた書籍を上梓した[Sato et al. 2012].



ランダムノイズの相互相関関数からグリーン関数を抽出する視点から、総合的なレビューを行い、雑誌特集号を編纂した[Campillo et al. 2011].



5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

- (1) Emoto, K., H. Sato and T. Nishimura, Synthesis and applicable condition of vector wave envelopes in layered random elastic media with anisotropic autocorrelation function based on the Markov approximation, *Geophys. J. Int.*, 査読有, **188**, 325-335, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.5264.x, 2012.
- (2) Nakahara, H., H. Sato, T. Nishimura, and H. Fujiwara, Direct observation of rupture propagation during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (M_w 9.0) using a small seismic array, *Earth Planets Space*, 査読有, **63**, 589-594, 2011.
- (3) Margerin, L. and H. Sato, Generalized optical theorems for the reconstruction of Green's function of an inhomogeneous elastic medium, *J. Acous. Soc. Amer.*, 査読有, **130**, 3674-3690, doi:10.1121/1.3652856, 2011a.
- (4) Margerin, L. and H. Sato, Reconstruction of multiply-scattered arrivals from the cross-correlation of waves excited by random noise sources in a heterogeneous dissipative medium, *Wave Motion*, 査読有, **48**, 146-160, 2011b.
- (5) Sawazaki, K., H. Sato and T. Nishimura, Envelope synthesis of short-period seismograms in 3-D random media for a point shear-dislocation source based on the forward scattering approximation: Application to small strike-slip earthquakes in southwestern Japan, *J. Geophys. Res.*, 査読有, **116**, B08305, doi:10.1029/2010JB008182, 2011.
- (6) Carcole, 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.*, 査読有, **180**, 268-290, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04394.x, 2010.
- (7) Yamamoto, M. and H. Sato, Multiple scattering and mode conversion revealed by an active seismic experiment at Asama volcano, Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 査読有, **115**, B07304, doi:10.1029/2009JB007109, 2010.
- (8) Emoto, K., H. Sato, and T. Nishimura, Synthesis of vector wave envelopes on the free surface of a random medium for the vertical incidence of a plane wavelet based on the Markov approximation, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 査読有, **115**, B08306, doi:10.1029/2009JB006955, 2010.
- (9) Sato, H., Retrieval of Green's function having coda waves from the cross-correlation function in a scattering medium illuminated by a randomly homogeneous distribution of noise

- sources on the basis of the first-order Born approximation, *Geophys. J. Int.*, 査読有, **180**, 759–764 doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04432.x, 2010.
- (10) Tripathi, J. N., H. Sato and M. Yamamoto, Envelope broadening characteristics of crustal earthquakes in northeastern Honshu, Japan, *Geophys. J. Int.*, 査読有, **182**, 988–1000 doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04657.x, 2010.
- (11) Sato, H., Retrieval of Green's function having coda from the cross-correlation function in a scattering medium illuminated by surrounding noise sources on the basis of the first order Born approximation, *Geophys. J. Int.*, 査読有, **179**, 408–412, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04296.x, 2009a.
- (12) Sato, H., Green function retrieval from the CCF of coda waves in a scattering medium, *Geophys. J. Int.*, 査読有, **179**, 1580–1583, 2009b.
- (13) Fukushima, Y., O. Nishizawa, and H. Sato, A performance study of a laser Doppler vibrometer for measuring waveforms from piezoelectric transducers, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency*, 査読有, **56**, 1442–1450, 2009.
- (14) Takahashi, T., H. Sato, T. Nishimura, and K. Obara, Tomographic inversion of the peak delay times to reveal random velocity fluctuations in the lithosphere: method and application to northeastern Japan, *Geophys. J. Int.*, 査読有, **178**, 1437–1455, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04227.x, 2009.
- (15) 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. Seismol. Soc. Am.*, 査読有, **99**, 352–366, 10.1785/0120080058, 2009.
- (16) Lee, W. S., H. Sato, and S. Yun, Estimation of coda Q in the mantle and characteristics of regional S-wave envelope, *Geosciences Journal*, 査読有, **13**, 363 – 369, 2009.

[学会発表] (計 5 件)

- (1) 佐藤 春夫, 短周期地震波の解析から推定された地球のランダム不均質構造, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 24 日, 幕張.
- (2) Sato, H., Retrieval of Green's function having a coda tail from the cross-correlation function in a scattering medium on the basis of the first

order Born approximation, AGU Fall Meeting 2010, 2010 年 12 月 14 日, San Francisco, California.

- (3) 佐藤 春夫, 相互相関関数解析を用いた散乱媒質におけるグリーン関数の理論的導出: ノイズ源が一様ランダムに分布する場合, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 24 日, 幕張.
- (4) 佐藤 春夫, 相互相関関数解析を用いた散乱媒質におけるコーダ波を持つグリーン関数の導出: 等方一次散乱モデル, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 2009 年 5 月 18 日, 幕張.
- (5) Carcole, E. and H. Sato, High resolution maps 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, EGU General Assembly 2009, 2009 年 4 月 20 日, Vienna, Austria

[図書] (計 2 件)

- (1) Sato, H., M. C. Fehler, and T. Maeda, “*Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth: the Second Edition*”, 1-494, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
- (2) Campillo, M., H. Sato, N. M. Shapiro, and R. D. van der Hilst (Guest Editors), Special issue entitled “*New Developments on Imaging and Monitoring with Seismic Noise*”, *Comptes Rendus Geoscience*, **343**, 487–652, 2011.

[その他]

ホームページ等

<http://www.zisin.geophys.tohoku.ac.jp/~sato/satoHP2012/Information.html>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
佐藤 春夫 (SATO HARUO)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 80225987

- (2) 研究分担者
無し

- (3) 連携研究者
無し