

平成 21 年 4 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007 - 2008

課題番号：19540435

研究課題名（和文） 短周期地震波を用いたリソスフェアの非一様・異方性不均質構造の研究

研究課題名（英文） Study on the non-uniform and non-isotropic inhomogeneous structure of the lithosphere by using short-period seismic waves

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：

微小地震によって励起される短周期地震波の伝播特性を解析し、リソスフェアのランダム不均質構造の推定を行った。順問題として、パルス波が伝播距離の増加と共に崩れ、最大振幅が初動より遅れ、P波の場合にはトランスバース成分が励起されることを解明した。逆問題として、最大振幅遅延時間の解析からランダム不均質のスペクトル構造を推定する方法を構築し、東北地方における解析から第4紀火山の下では不均質が強いことを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
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：地球惑星物理学・固体地球惑星物理学

キーワード：地震現象, 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

1秒より短周期の地震波形は複雑であり、不均質構造や震源過程を波形を用いて決定的に逆推定することは一般に難しい。しかし、位相を無視し振幅エンベロープの経時変化に着目することで、構造の不均質性の統計的特徴や震源断層からのエネルギー輻射分布を求めることは可能である。理論面では、波動場の2次モーメントに関する統計的發展

方程式を解く方法や輻射伝達理論に基づく方法などが開発されつつある。

今後、周波数帯ごとの微小地震波形エンベロープの解析からS波の減衰や散乱特性の地域性、さらには速度不均質のスペクトルの地域性にいたるまで明らかにすることが望まれている。ランダム不均質媒質のアンサンブルを考えて統計的に波動伝播を考察することは、短周期地震波の伝播を考える上で特

に優れた方法であるが、未だ限られた条件のもとでの解が得られているのみである。今後、ランダム媒質のスペクトルの一般化や、非一様性や異方性を持つ場合への拡張が強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ランダム不均質速度構造の中を伝播する短周期地震波の伝播に関する数理論を発展させ、微小地震波形のエンベロープ解析からランダム不均質構造のスペクトルを推定する方法を開発することである。これは、決定論的な方法では難しい微小地震波形解析に基づくリソスフェアの短波長不均質構造の解明や、短周期強震動の定量的予測のための数理的基礎を与える。統計的記述は、既往の速度・減衰のトモグラフィー解析と相補的に不均質構造の記述様式をより豊かにするものと期待される。

3. 研究の方法

(1) ランダム不均質弾性媒質におけるベクトル3成分波形エンベロープの理論的研究

波長が不均質の尺度よりも短い場合にはP波とS波の変換散乱を無視することができ、放物型の方程式にマルコフ近似を適用することによりベクトル3成分のエンベロープを導出することができる。この方法をランダム不均質のスペクトルが異方性を持つ場合に拡張することを試みる。ランダム不均質媒質における波動伝播の統計数理的モデル化を行うと共に数値シミュレーションを実施する。

(2) 地震の波形エンベロープの解析に基づくリソスフェアの非一様不均質構造の解明

スペクトルを記述する統計的パラメータが空間的に緩やかに変化する非一様なランダム不均質媒質におけるパルス波の伝播の理論的研究を行う。エンベロープの直接導出を定式化し、スペクトル構造の統計的パラメータを用いて最大振幅遅延時間を解析的に推定する方法を考案する。逆問題として、最大振幅遅延時間から非一様なランダム不均質構造を求めるインバージョン解析法を構築する。

このインバージョン解析を東北地方における微小地震のS波水平動(HI-NET データ)の最大振幅遅延時間測定値に適用し、不均質スペクトルの空間分布を推定する。

(3) 遠地地震P波の Transverse 成分の解析に基づくリソスフェアの不均質構造の地域性の解明

IRIS による遠地地震P波データを収集し、Transverse 成分のエンベロープ時系列とエネルギーの配分比の解析から、リソスフェアの不均質構造を解明する。

(4) 浅い不均質地盤の増幅特性に見られる方性の時間変化の精密測定とそのモデル化

2000年鳥取県西部地震の強震動を受け、KiK-net 伯太観測点では地盤の剛性率低下が観測された。同観測点では地表と地中100mに地震計が設置されており、記録された小地震記録のコーダ波のデコンボリューションを行うことにより、本震後の剛性率の回復過程の精密な解析を行う。

4. 研究成果

(1) ランダム不均質弾性媒質におけるベクトル3成分波形エンベロープの理論的研究

① ガウス型スペクトルで特徴づけられる異方性ランダム不均質弾性媒質におけるベクトル3成分波形エンベロープを、マルコフ近似理論を用いて理論的に導出した[Sato, 2008]. エンベロープ形状は波線方向に強く支配されることを明らかにした。

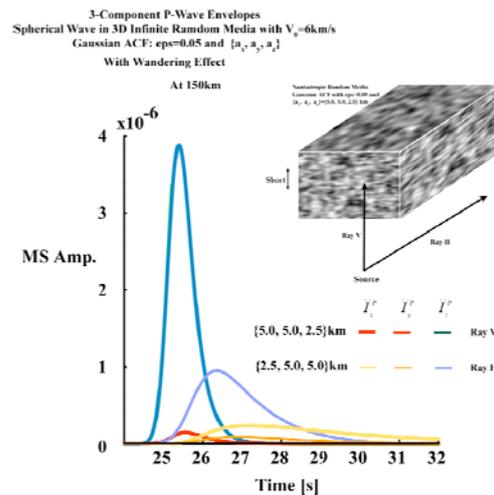


図1. 異方性ランダム媒質における3成分波形エンベロープ形状[Sato, 2008].

② IASPEI の Task Group on Scattering and Heterogeneity の代表として、研究成果を書籍 “Earth Heterogeneity and Scattering Effects on Seismic Waves” (Advances in Geophysics, Vo. 50) にとりまとめ、Academic Press 社より刊行した。

③ 固体地球の不均質構造と地震波の散乱に関する書籍 “Seismic Wave propagation and scattering in the heterogeneous earth” の改訂版を Springer 社より刊行した。

(2) 地震の波形エンベロープの解析に基づくリソスフェアの非一様不均質構造の解明

① ランダム不均質がフォンカルマン型スペクトルを持つ場合、その中を伝播するパルス

波の最大振幅の初動からの遅れが伝播距離と中心周波数に依存する法則を見出した[Takahashi et al. 2008]. この法則をもとにして、観測された微小地震S波の最大振幅遅延時間をインバージョン解析したところ、特に第4紀火山の下でランダム不均質のスペクトル勾配が緩い、即ち、短波長スペクトルに富むことを明らかにした。

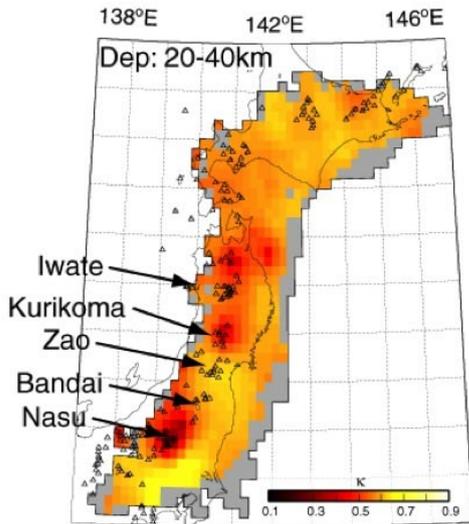


図2. S波最大振幅遅延時間の解析に基づく速度不均質の短波長スペクトルの勾配の空間分布[Takahashi et al. 2009, 投稿中].

(3) 遠地地震P波の Transverse 成分の解析に基づくリソスフェアの不均質構造の地域性の解明

- ① 遠地P波のエネルギーのトランスバース成分への配分比を、Markov 近似に基づくベクトル 3 成分エンベロープ理論[Sato, 2006]を用いて解析した。その結果、衝突帯や沈み込み帯において、不均質が強いことが明らかになった。

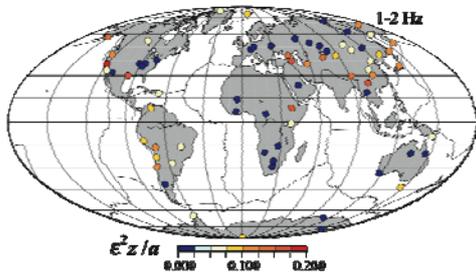


図3. 厚さ z のリソスフェアの速度揺らぎ ϵ^2 と相関距離 a の比[Kubanza et al. 2007].

(4) 浅い不均質地盤の増幅特性に見られる異方性の時間変化の精密測定とそのモデル化

- ① KiK-net 伯太観測点において、地表と地中

100m に設置されている小地震記録のコーダ波のデコンボリューション解析を行った。深さ 0-11m において剛性率変化が生じたと仮定した場合、本震直後の剛性率は 50% 低下し、その後数年をかけて本震前の 96% の水準まで回復することを明らかにした。剛性率は本震からの経過時間の対数に比例して回復することがわかった。

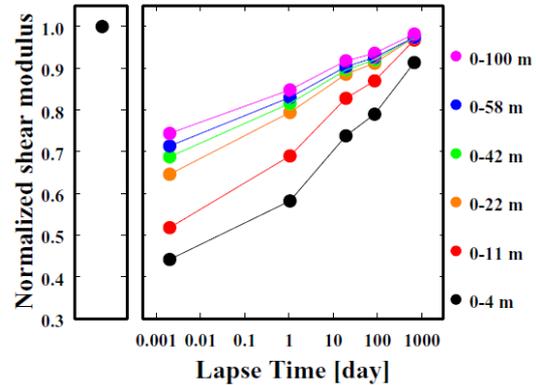


図4. 2000年鳥取県西部地震後の地盤剛性率の時間変化。縦軸は本震前の値で規格化された剛性率。横軸は本震からの経過時間[Sawazaki et al. 2009].

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 10 件)

- ① Sawazaki, K., Sato, H., Nakahara, H. and Nishimura, T., 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., Vol. 99, No. 1, pp. 352-366, 10.1785/0120080058, 2009. 査読有
- ② Saito, T., Sato, H. and Takahashi, T., Direct simulation methods for scalar-wave envelopes in two-dimensional layered random media based on the small-angle scattering approximation, Commun. Comput. Phys., 3, 63-84, 2008. 査読有
- ③ Sato, H., Synthesis of vector-wave envelopes in 3-D random media characterized by a nonisotropic Gaussian ACF based on the Markov approximation, J. Geophys. Res., 113, B08304, doi:10.1029/2007JB005524, 2008. 査読有

- ④Takahashi, T., H. Sato and T. Nishimura, Recursive formula for the peak delay time with travel distance in von Karman type non-uniform random media on the basis of the Markov approximation, *Geophys. J. int.*, 173, 534-535, 2008. doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03739.x, 2008. 査読有
- ⑤Maeda, T. H. Sato and T. Nishimura, Synthesis of coda wave envelopes in randomly inhomogeneous elastic media in a half-space: single scattering model including Rayleigh waves, *Geophys. J. int.*, 172, 130-154, 2008. 査読有
- ⑥Kubanza M., T. Nishimura and H. Sato, Evaluation of strength of heterogeneity in the lithosphere from peak amplitude analyses of teleseismic short-period vector P-waves, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03544.x, 2007. 査読有
- ⑦佐藤春夫, 短周期地震波エンベロープの特徴と理論モデルの構築, *月刊地球*, 29, 2-7, 2007. 査読無
- ⑧Sato, H. and M. Korn, Envelope syntheses of cylindrical vector-waves in 2-D random elastic media based on the Markov approximation, *Earth Planets Space*, 59, 209-219, 2007. 査読有
- ⑨ Sato, H., Synthesis of vector-wave envelopes in 3-D random elastic media characterized by a Gaussian autocorrelation function based on the Markov approximation: Spherical wave case, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 112, B01301, doi:10.1029/2006JB004437, 2007. 査読有
- ⑩Takahashi, T., H. Sato, T. Nishimura and K. Obara, Strong inhomogeneity beneath Quaternary volcanoes revealed from the peak delay analysis of S-wave seismograms of microearthquakes in northeastern, Japan, *Geophys. J. Int.*, 168, 90-99, 2007, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03197.x. 査読有
- [学会発表] (計 13 件)
- ① Sato, H. and Yamamoto, M., Radiative transfer approach to the equipartition in scattering media, IASPEI General Assembly, Jan. 15, 2009, Cape Town, South Africa.
- ②Carcole, E. and Sato, H. Separation of scattering and intrinsic attenuation in the lithosphere of all Japan estimated from observations of HINET stations, IASPEI General Assembly, Jan. 15, 2009, Cape Town, South Africa.
- ③Sawazaki, K., Sato, H. and Nishimura, T., Simulation of vector-wave envelopes in 3-D random elastic media for non-spherical radiation source based on the stochastic ray path method, AGU Fall Meeting 2008, Dec. 17, 2008, San Francisco, California.
- ④Anggono, T., Nishimura, T., Sato, H., Ueda, H. and Ukawa, M., Temporal changes of seismic velocity of shallow structure associated with the 2000 Miyakejima Volcano activity as inferred from ambient seismic noise correlation analyses, AGU Fall Meeting 2008, Dec. 17, 2008, San Francisco, California.
- ⑤Emoto, K., Sato, H. and Nishimura, T., Envelope synthesis on the free surface of a random elastic medium based on the Markov Approximation, AGU Fall Meeting 2008, Dec. 17, 2008, San Francisco, California.
- ⑥Anggono, T., Nishimura, T., Sato, H., Ueda, H. and Ukawa, M., Ambient seismic noise correlation analyses for the 2000 Miyakejima Volcano activity, ASC General Assembly and SSJ Fall Meeting 2008, Nov. 26, 2008, Tsukuba, Japan.
- ⑦Emoto, K., Sato, H. and Nishimura, T., Synthesis of vector-wave envelopes on the free surface of a 3-D random medium based on the Markov approximation, ASC General Assembly and SSJ Fall Meeting 2008, Nov. 26, 2008, Tsukuba, Japan.
- ⑧Anggono, T.・西村 太志・佐藤 春夫・上田 英樹・鶴川 元雄, Temporal Changes of Seismic Velocity of Shallow Structure Associated with the 2000 Miyakejima Volcano Activity, 日本火山学会2008年秋期大会, 盛岡, 2008年10月13日.
- ⑨ Anggono, T.・西村 太志・佐藤 春夫・植木 貞人, Shallow seismic structure of Onikobe geyser, Miyagi Prefecture based on the analyses of active seismic experiment data, 地球惑星科学関連学会2008年合同大会, 幕張, 2008年5月28日.
- ⑩江本 賢太郎・西村 太志・佐藤 春夫, 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 -マルコフ近似理論-,
地球惑星科学関連学会2008年合同大会, 幕
張, 2008年5月28日.

⑪ 山本 希・佐藤 春夫, 火山体構造探査デー
タにみる地震波エネルギー伝播の拡散的性
質, 地球惑星科学関連学会2008年合同大会,
幕張, 2008年5月27日.

⑫ Yamamoto, M. and Sato, H., Diffusive
characteristics of seismic energy
revealed from a dense seismic
observation at Asama volcano, Japan, EGU
General Assembly 2008, Apr. 15, 2008,
Vienna, Austria.

⑬ Sato, H. Envelope synthesis of
high-frequency seismic waves in the
lithospheric inhomogeneity, AGU Fall
Meeting 2007, Dec. 14, 2007, San Francisco,
California.

[図書] (計5件)

① Sato, H., Scattering of seismic waves in
the heterogeneous Earth (分担執筆), in
“Encyclopedia of Complexity and Systems
Science (Ed. R. A. Mayers)”, Springer
Verlag GmbH, Heidelberg, 2009, 印刷中.

② Sato, H. and M. C. Fehler, “Seismic Wave
Propagation and Scattering in the
Heterogeneous Earth” (Second Print),
Springer Verlag and AIP Press, New York,
1-308, 2008. (全章執筆)

③ Sato, H. and Fehler. M. C., “Earth
Heterogeneity and Scattering Effects on
Seismic Waves” (責任編集), in Advances in
Geophysics (Series Ed. R. Dmowska),
Academic Press, Vol. 50, 1-476, 2008.

④ Sato, H. and Korn, M., Synthesis of
vector-wave envelopes in random elastic
media on the basis of the Markov
approximation (分担執筆), in “Earth
Heterogeneity and Scattering Effects on
Seismic Waves (Eds. H. Sato and M. Fehler)”,
Advances in Geophysics (Series Ed. R.
Dmowska), Academic Press, 50, 44-94, 2008.

⑤ Sato, H. and M. C. Fehler, Synthesis of
Seismogram Envelopes in Heterogeneous
Media (分担執筆), in “Advances in Wave
Propagation in Heterogeneous Earth” (Eds.
R. S. Wu and V. Maupin), “Advanced in
Geophysics (Series Ed. R. Dmowska), 48,
Academic Press, 561-596, 2007.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ

<http://zisin.geophys.tohoku.ac.jp/~sato/index-j.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

山本 希 (YAMAMOTO MARE)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号:30400229

(3) 連携研究者

西村 太志 (NISHIMURA TAKESHI)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号:40222187