

機関番号：22701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540413

研究課題名（和文） 地震波干渉法による強震動記録を用いた大深度地盤構造の推定

研究課題名（英文） Deep ground structure imaging by the seismic interferometry of strong ground motion record

研究代表者

吉本 和生（YOSHIMOTO KAZUO）

横浜市立大学・生命ナノシステム科学研究科・准教授

研究者番号：10281966

研究成果の概要（和文）：強震動記録を利用した大深度地盤構造の探査に関わる研究を実施した。具体的には、基礎研究として、地震波伝播に関して、2次元散乱媒質中におけるP波及びS波の伝播の研究、S波減衰とリソスフェアの短波長不均質性に関する研究、非定常射線分解法に関する研究を行った。また、これらの研究成果を踏まえて、地震波干渉法による強震動記録の解析から大深度の地盤応答関数が安定して評価できることを実証し、大規模に堆積層が発達した関東平野において大深度地盤構造を推定した。

研究成果の概要（英文）：The research to explore the deep ground structure by using the strong ground motion record was conducted. This research includes the geophysical topics such as the radiative transfer of elastic waves in two-dimensional isotropic scattering media, frequency-dependent attenuation of S-waves and short wavelength heterogeneity of the lithosphere, and the nonstationary ray decomposition in a homogeneous half space. In addition, our research demonstrated that the seismic interferometry of strong ground motion record is very effective to investigate the response function of deep ground structure, and imaged the deep ground structure of the Kanto plain successfully.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
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：地震波干渉法，地盤構造，強震動記録

1. 研究開始当初の背景

近年の数理物理的な研究によって、地震波動場の相関解析から、地球内部構造に関する情報が抽出できる可能性が示されている。この解析手法（地震波干渉法）を、既設の高密度地震観測網で収録された地震波形に適用

できれば、高空間分解能の地下構造探査を遂行できるものと考えられる。

関東地方は、日本の政治・経済機能の中心であり、国内の総人口の約3分の1が集中していることなどから、地震防災の必要性の特に高い地域であると考えられている。しかし

ながら、関東平野は厚い堆積層で被覆されており、その大深度地盤構造の詳細は依然として不明である。このことは、当地域で正確な強震動予測を実現するにあたっての大きな問題点になっている。

2. 研究の目的

以上のような背景に鑑み、本研究では、強震動波形記録を利用した高分解能の地下構造の推定を可能にするために、地震波干渉法とそれに関わる地震波動伝播モデルの理論的な枠組みを構築するとともに、新しく開発した解析手法を首都圏強震動総合ネットワーク (SK-net) や首都圏地震観測網 (MeSO-net) など で得られた波形記録に適用して、関東平野における大深度地盤構造の地域変化を明らかにすることを主な目的とした。地震波干渉法の強震動波形記録への適用方法を確立できれば、大規模な沖積平野の発達した他の地域においても、既存の強震動観測網のデータなどを有効に活用した大深度地盤構造の推定が可能になる。

3. 研究の方法

(1) 2次元散乱媒質中におけるP波及びS波の伝播

輻射伝達理論は、1980年代に地震学に導入されて以降、多重散乱の影響を厳密に考慮した地震波エンベロープの合成に利用されている。本研究では、この理論に基づいて、2次元等方散乱媒質中の点震源から輻射されたP波及びS波に対する地震波エンベロープの新しい理論合成方法を提案した。

(2) S波減衰とリソスフェアの短波長不均質性

Hi-netのボアホール地震観測井で収録された115の地震波形の解析から、周波数1-32Hz帯において、関東地方のリソスフェアを伝播するS波の減衰の大きさを測定した。また、内部減衰と散乱減衰を分離測定し、後者の測定値と一次散乱理論モデルの予測値との比較によって、リソスフェアの構造の不均質性のスペクトル特性を推定した。

(3) 非定常射線分解法に関する研究

地震波の構成位相を正確に把握するためには、地震波形を非定常時系列とみなした解析手法の確立が求められる。このため、基礎研究として、まず、水平成層構造中を伝播するSH波の瞬時パワーの評価に基づいて、水平成層構造の速度不連続境界で生成される波の挙動について明らかにした。さらに、地表記録のみから水平成層構造内での地震波の挙動を推定するとともに、速度不連続境界を検出する解析手法を開発した。

(4) 地震波干渉法による地盤応答関数の評価

地震波干渉法では、原理的に、水平成層構造上に位置する観測点に下方から入射するSH波の自己相関解析から地盤応答関数が評価できることが示されている (例えば、Claerbout, 1968; Nakahara, 2006)。本研究では、大規模に堆積層構造が発達した関東平野において、強震動記録の解析から大深度の地盤応答関数が実際に安定して推定できるかどうか検証した。

(5) 関東平野の大深度地盤構造の推定

地震波干渉法による地盤応答関数の評価では、多数の観測点において地震基盤 (先新第三系基盤) からの反射S波位相が検出された。この位相の発現時間は地域によって大きく変化するが、大局的には、関東平野周辺の山地部から東京湾に向かって連続的に大きくなる (最大値は8秒程度)。本研究では、この値 (S波の地表 - 地震基盤の往復走時) を、VSP法調査 (山水 2004・他) で得られている首都圏内14地点のS波速度構造モデルを線形補間及び外挿して用いることで深度に変換して、大深度地盤構造を推定した。

4. 研究成果

(1) 2次元散乱媒質中におけるP波及びS波の伝播

2次元無限媒質中に等方散乱体が一様ランダムに分布すると仮定し、点震源から瞬間的かつ等方的に輻射されるP波及びS波のエネルギーの時空間分布を表わす連立積分方程式をたてた。本研究では、数値的な安定性を確保するため、直達項と1次散乱項については楕円座標系を導入することにより解析的な表現を求め、2次以上の多重散乱項についてのみフーリエ・ラプラス変換を利用して数値的に解く手法を開発した。この手法によって、2次元散乱媒質でのP波及びS波の伝播とエネルギー平衡状態への遷移について容易かつ厳密な評価が可能になった。

(2) S波減衰とリソスフェアの短波長不均質性

多重等方散乱モデルを利用した Multiple Lapse Time Window法によって、関東地方のリソスフェアを伝播するS波の減衰の大きさを測定した。その結果、S波のQ値は、1Hzで100程度、10Hzで500程度であることが確認された。さらに、S波の減衰メカニズムを推定したところ、約2Hzよりも低周波数帯では散乱減衰、それよりも高周波数帯では内部減衰が卓越することが明らかになった。また、10Hz程度以上の周波数帯で散乱減衰のQ値がほぼ一定になることなどから、リソスフェアの構造の不均質性がガウス型と自己

相関型のランダム性の重ね合わせとしてモデル化されることが示された。

(3) 非定常射線分解法に関する研究

水平成層構造内における SH 波の瞬時パワーに着目して、水平成層構造の速度不連続境界で生成される波とその伝播特性について評価した。地表記録のみから成層構造内での地震波の挙動を推定するため、波動方程式のダランベール解とウイグナー分布を用いて、地表で観測された地震波を構成する個々の波群を、半無限層中の射線に分解するとともに、射線に付随する波(加速度や剪断歪みなど)の瞬時パワーとして推定し、可視化する方法を開発した。この方法は、関東地域の厚い堆積層内の速度不連続境界を検出するのに有効であり、上総層と三浦層の境界、及び、地震基盤上面境界等の検出が可能であることを確認した。

(4) 地震波干渉法による地盤応答関数の評価

評関東平野に展開されている地震観測網 (SK-net や MeSO-net など) で記録された近地地震の波形から SN 比の良いものを選んでデータベース化した。集積した地震波形 (その大部分は強震波形) を解析し、観測点ごとに直達 S 波 (SH 成分) の自己相関関数を求めて重合処理することで地盤応答関数を評価した。その結果、関東平野における多数の観測点の地盤応答関数から、地震基盤からの反射波の位相を検出できることが確認された。また、この反射波の走時が、既往の調査・研究 (反射法地震探査や屈折法地震探査など) から推定されている地震基盤の深さから予測される値と概ね整合することが確かめられた。地域によっては、堆積層内の地質学的境界 (上総層と三浦層の境界など) からの反射波も明瞭に確認された。

(5) 関東平野の大深度地盤構造の推定

関東平野内の 750 地点において地盤構造を推定した (図 1)。地震基盤の深さは、場所によっては 4km を超えるなど、地域によって大きく変化することが明らかになった。この結果は、従来の研究報告と大局的には整合するものであったが、東京都の中央部からほぼ北方向に連続する地震基盤の陥没など、水平方向に十 km 程度のスケールで堆積層及び地震基盤の構造が局所的に変化する様子がより明瞭に確認された。

また、隣接した観測点における地盤応答関数を深度変換した後に群列表示することにより、関東平野内の複数の測線について疑似反射断面を合成することに成功した (図 2)。このことで、反射法地震探査が実施されていない地域においても、大深度地盤構造を水平

空間分解能 2~3km 程度で正確に把握できるようになった。

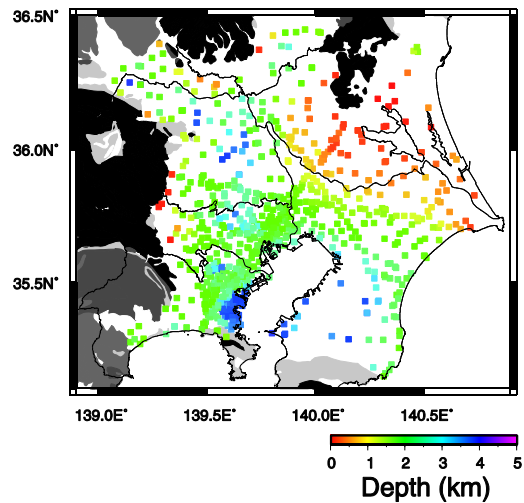


図 1 関東平野における地震基盤の深度。

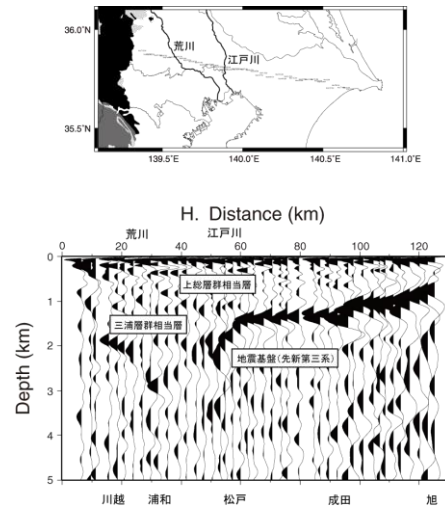


図 2 入間 - 銚子測線の疑似反射断面。

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 4 件)

- ① Nakahara, H. and K. Yoshimoto, Radiative transfer of elastic waves in two-dimensional isotropic scattering media: Semi-analytical approach for isotropic source radiation, Earth Planets Space, accepted. (査読有)
- ② 吉本和生・平田直・笠原敬司・小原一成・佐藤比呂志・酒井慎一・鶴岡弘・中川茂樹・木村尚紀・棚田俊收・明田川保・中原恒・木下繁夫, 地震波干渉法によって推定された関東平野の地下構造, 日本地質学会関

東支部 - 日本第四紀学会ジョイントシンポジウム「関東盆地の地下地質構造と形成史」(2010年11月20~21日)講演資料集, 25-28, 2010. (査読無)

- ③ Kinoshita, S., Nonstationary ray decomposition in a homogeneous half space, *Earth Planets Space*, 61, 1297-1312, 2009. (査読有)
- ④ Yoshimoto, K. and M. Okada, Frequency-dependent attenuation of S-waves in the Kanto region, Japan, *Earth Planets Space*, 61, 1067-1075, 2009. (査読有)

[学会発表] (計11件)

- ① Yoshimoto, K., N. Hirata, K. Kasahara, K. Obara, H. Sato, S. Sakai, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, H. Kimura, T. Tanada, T. Aketagawa, H. Nakahara, and S. Kinoshita, Seismic Basement Structure beneath the Tokyo Metropolitan Area Inferred from Seismic Interferometry, AGU 2010 Fall Meeting, Moscone Center, San Francisco, USA, Dec. 16, 2010.
- ② 吉本和生・平田直・笠原敬司・小原一成・佐藤比呂志・酒井慎一・鶴岡弘・中川茂樹・木村尚紀・棚田俊收・明田川保・中原恒・木下繁夫, 地震波干渉法によって推定された関東平野の地下構造, 日本地質学会関東支部 - 日本第四紀学会ジョイントシンポジウム「関東盆地の地下構造と形成史」, 日本大学文理学部, 2010年11月20日.
- ③ 中原恒・吉本和生, 2次元等方散乱媒質における弾性波の輻射伝達, 日本地震学会2010年度秋季大会, 広島国際会議場, 2010年10月29日.
- ④ 吉本和生・平田直・笠原敬司・小原一成・佐藤比呂志・酒井慎一・鶴岡弘・中川茂樹・木村尚紀・棚田俊收・明田川保・中原恒・木下繁夫, 地震波干渉法による東京湾北岸部の地震基盤構造の推定, 日本地震学会2010年度秋季大会, 広島国際会議場, 2010年10月28日.
- ⑤ 吉本和生・平田直・笠原敬司・酒井慎一・小原一成・棚田俊收・鶴岡弘・中川茂樹・中原恒・木下繁夫・佐藤比呂志, 地震波干渉法による首都圏の地震基盤構造の推定: 疑似反射断面図, 地球惑星科学関連学会2010年合同大会, 幕張メッセ, 2010年5月26日.
- ⑥ 岡田摩利子・吉本和生, 関東地方のリソスフェアにおけるS波の散乱減衰と内部減衰, 日本地震学会2009年度秋季大会, 京都大学, 2009年10月21日.
- ⑦ 吉本和生・平田直・笠原敬司・酒井慎一・小原一成・棚田俊收・鶴岡弘・中川茂樹・中原恒・木下繁夫・佐藤比呂志, 地震波干

渉法による首都圏の地震基盤構造の推定, 日本地震学会2009年度秋季大会, 京都大学, 2009年10月23日.

- ⑧ 吉本和生・平田直・笠原敬司・酒井慎一・小原一成・棚田俊收・鶴岡弘・中川茂樹・中原恒・木下繁夫・佐藤比呂志, 地震波干渉法による首都圏の地震基盤構造の推定: 首都圏地震観測網 (MeSO-net) つくば - 横浜測線データの解析, 地球惑星科学関連学会2009年合同大会, 幕張メッセ, 2009年5月19日.
- ⑨ Yoshimoto, K., K. Sakurai, H. Nakahara, S. Kinoshita, and H. Sato, Seismic basement structure beneath the Kanto plain, Japan inferred from the seismic interferometry for strong motion records, Symposium on "Seismic Wave Scattering and Noise Correlation", Tohoku University, Feb. 16, 2009.
- ⑩ Yoshimoto, K., K. Sakurai, H. Nakahara, S. Kinoshita, and H. Sato, Seismic basement structure in the Kanto, Japan inferred from the seismic interferometry of strong motion records, The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Tsukuba International Congress Center, Nov. 26, 2008.
- ⑪ 吉本和生・中原恒・木下繁夫, 地震波干渉法による東京湾西岸部の地震基盤構造の推定 (続報), 地球惑星科学関連学会2008年合同大会, 幕張メッセ, 2008年5月28日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉本 和生 (YOSHIMOTO KAZUO)
横浜市立大学・生命ナノシステム科学研究科・准教授
研究者番号: 10281966

(2) 研究分担者

木下 繁夫 (KINOSHITA SHIGEO)
横浜市立大学・生命ナノシステム科学研究科・教授
研究者番号: 90360015

中原 恒 (NAKAHARA HISASHI)
東北大学・理学研究科・助教
研究者番号: 20302078

(3) 連携研究者

佐藤 比呂志 (SATO HIROSHI)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号: 00183385