

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30日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22654053

研究課題名（和文）マルチモード表面波の非線形波形解析による3次元非弾性減衰構造への挑戦

研究課題名（英文）Challenges for a 3-D anelastic attenuation structure from multi-mode surface waves with nonlinear waveform analysis

研究代表者

吉澤 和範（YOSHIZAWA KAZUNORI）

北海道大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：70344463

研究成果の概要（和文）：地球内部の温度や水の存在を知る上で重要な3次元非弾性減衰構造の復元に向け、表面波の位相及び振幅の解析法の開発及び高密度観測網への応用を行い、さらに3次元異方的速度モデルの高精度化も行った。表面波振幅から得られた北米の予備的な減衰構造モデルから、ホットスポット火山や地溝帯での高減衰域や、安定地塊での低減衰域が明らかとなり、速度構造との大域的な相関も示された。さらに大陸域での新しい速度モデルから、高速で移動する豪州プレート直下で、強い水平流の影響と考えられる特異な鉛直異方性の存在が確認された。

研究成果の概要（英文）：For the reconstruction of high-resolution attenuation structure of the upper mantle, surface wave phase and amplitude data are collected using recent high-density seismic networks in continental regions. A preliminary surface-wave attenuation model of North America revealed the high attenuation beneath western US (incl. hotspot and rift zone), whereas low attenuation is seen beneath stable cratons and plateau, suggesting clear correlation between the velocity and attenuation structures on a large scale. Furthermore, refined shear velocity models in continental regions revealed anomalously strong radial anisotropy beneath LAB of central Australia, which is likely to be caused by the strong shear beneath the fast moving Australian plate.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	0	2,300,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	150,000	2,950,000

研究分野：地震学，地球内部構造

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：表面波，トモグラフィー，減衰構造，速度構造

1. 研究開始当初の背景

上部マントル内部のダイナミクスを解明する上で、地震表面波から得られる3次元の

な速度構造や非弾性減衰構造は、重要な情報源である。最近の高密度地震観測網の発展により、3次元速度構造モデルの高分解能化が

進み、S波速度の不均質性や異方性分布など、固体地球の弾性的性質に関する理解は飛躍的に進んでいる。一方、地球内部の熱的状態や水の存在をより直接的に反映する非弾性的性質に起因する減衰構造に関しては、観測波形の振幅解析の本質的な困難さもあり、速度構造と同程度の詳細な3次元分布を復元できるまでには至っていない。これは主に観測波形の振幅が、散乱波やノイズ等、様々な影響を受け易く本質的に解析が困難であることによる。近年、観測データの質・量の向上により、長周期表面波の振幅データを用いたグローバルスケールでの減衰構造モデルも提唱されているが、未だ水平分解能2000km程度の大規模3次元構造が得られる程度であり、リージョナルからローカルスケールの速度構造モデルと同程度の分解能（数100km程度）での減衰構造モデルの研究は、今なお発展途上の段階にある。

2. 研究の目的

本研究では、マルチモード表面波の位相情報による3次元速度構造に加えて、表面波の振幅情報を利用した3次元非弾性減衰構造の高精度復元へ向けた手法の確立を目的とする。特に、非線形波形インバージョン法に基づくマルチモード表面波の分散性解析や、高密度アレイを活用した2観測点間の振幅比および位相速度測定法を活用し、大量かつ高精度な振幅及び位相情報の抽出と、減衰構造及び速度構造のマッピングを行う。

3. 研究の方法

(1) 表面波の分散解析

本研究では、高密度な地震観測網の波形記録から、表面波の位相及び振幅の周波数毎の情報を抽出し、高精度な速度構造及び減衰構造モデルの復元を行っていく。その際、主に、以下の二つの手法を活用して観測波形の解析を行う。

①非線形波形インバージョン法に基づく表面波の分散性解析：

表面波の基本モード及び高次モードの波形は、短い震央距離(5000km以下)では互いに重なるため、モード毎の振幅や位相の直接計測は困難である。しかし、震源-観測点間の平均的な1次元構造モデルをパラメータとして波形全体をフィッティングすることで、マルチモード表面波の波線平均の分散情報を抽出できる。非線形なモデル探索法に基づくこの手法には相当の計算時間を要するが、PCクラスタを活用した自動解析により効率的な処理が可能となる[Yoshizawa & Ekstrom, GJI, 2010]。また、この手法では、特に基本

モードと高次モードの分離が容易ではないラブ波の場合でも同様の解析が可能であり、高精度な鉛直異方性分布の復元にも有効である。

②高密度アレイを活用した2点法解析：

震源-観測点間の情報を抽出する1点法では、短い波線(約1000km以下)での表面波解析は困難であるが、近年、世界各地の大陸域に展開されている高密度な地震観測アレイの波形記録を用いることにより、波長程度の短い2点間距離での位相及び振幅情報の抽出が可能となる。この手法では基本モードの解析が主となるが、大量のデータを収集しやすいことから、高分解能な速度・減衰構造のマッピングに極めて有効である。

(2) S波速度及び減衰構造のマッピング

波形解析を通じて得られた振幅および位相速度データを用いて、Yoshizawa & Kennett [JGR, 2004]による表面波トモグラフィ法により空間分布に展開し、表面波の減衰係数分布およびS波速度分布を復元する。

4. 研究成果

(1) 表面波の振幅測定と減衰係数分布のマッピングー北米大陸への応用：

表面波の振幅データを大量に収集するために、北米の高密度観測網を利用した振幅解析を行った。震源-観測点間の波線に対する振幅計測では、震源パラメータが必要である上、散乱・回折等、途中経路の構造の影響も大きく、測定精度に限界がある一方で、高密度アレイを利用した2点間の振幅測定では、震源情報が不要であり、比較的短い距離での観測点間の振幅異常を十分な精度で大量に収集できることが試験解析を通じて明らかとなった。

そこで、特に良質な観測波形が大量に得られる北米大陸の高密度地震観測網(USArray)を中心とする5年間分の観測波形記録に適用し、約10万波線に対する試験的な2観測点間の振幅データを収集した。これらを用いて、周波数毎の減衰係数の空間分布に展開した(図1)。

この予備的な表面波減衰モデルでは、米国西部の火山地域一帯が顕著な高減衰領域となり、さらにリオ・グランデ地溝帯やホットスポット火山であるイエローストーン直下においても局所的な高減衰領域が見られる。その一方、コロラド高原や大陸東部のクラトン地域等の安定地塊では低減衰領域となり、表層テクトニクスとの相関も見てとれる。

速度構造モデル(例えば、図2a)との比較から、大局的には、北米西部の低速度領域が高減衰領域となり、東部の高速度領域が低減

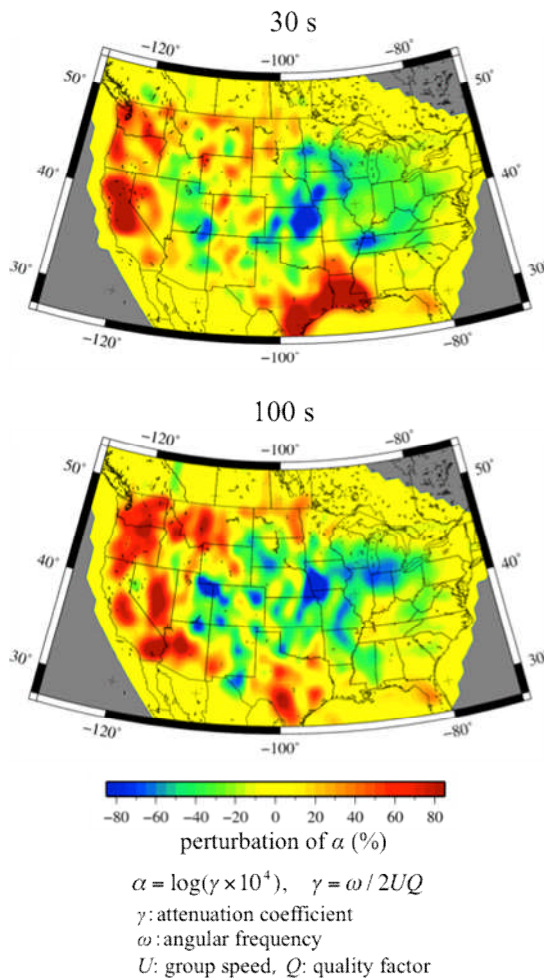


図 1 北米大陸のレイリー波減衰係数分布 (上: 周期 30 秒, 下: 周期 100 秒). 赤は高減衰, 青は低減衰を示す.

衰領域となるなど, 速度構造と減衰構造との間に明らかな相関がある. このことから, 大陸リソスフェア内部の温度分布の違いが, 速度及び減衰構造の双方の大規模な不均質分布に影響を与えていることが示唆される.

現段階で利用した試験的データでは, 個々の振幅データの測定値のばらつきも大きい, この予備的な減衰構造モデルの結果から, 高密度アレイから得られる大量の振幅異常データが, 高分解能な 3 次元減衰モデルの復元に極めて有効であることが示された. 今後, 測定精度の向上や観測点補正等, 計測された振幅データやモデルの更なる改善を進めていく予定である.

(2) S 波異方的速度構造モデルの高精度化と LAB 推定:

振幅データから 3 次元的な Q 構造モデルを求める際に欠かせない 3 次元速度構造の高精度化も行った. 特に, 高密度な観測網が利用できる北米大陸及び豪州大陸におけるマルチモード表面波の位相速度情報を用い

て, 最新の 3 次元異方的不均質構造モデルの復元を行い, これら 3 次元 S 波速度から得られる負の鉛直速度勾配から, リソスフェア-アセノスフェア境界 (以後, LAB とする) の空間分布を推定した.

推定された LAB 分布と, SV 波及び SH 波の速度の違いから得られる鉛直異方性の 3 次

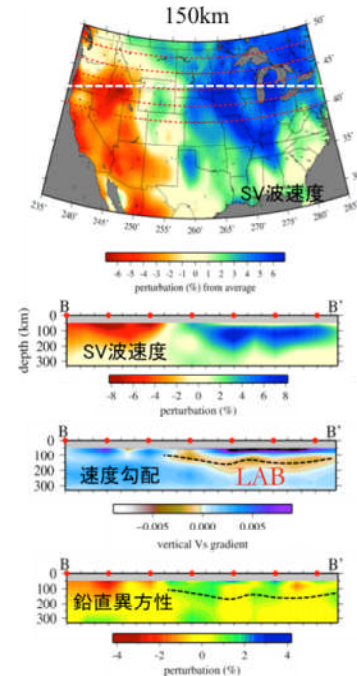


図 2 (a) 北米大陸リソスフェアの異方的速度構造とリソスフェア-アセノスフェア境界 (断面図内の点線).

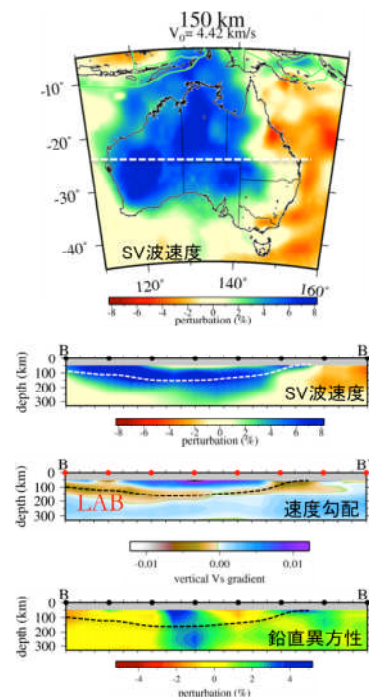


図 2 (b) 豪州大陸リソスフェアの異方的速度構造とリソスフェア-アセノスフェア境界 (断面図内の点線).

元分布とを比較した所、特に豪州大陸中央部の LAB 直下において、顕著な鉛直異方性 (SH>SV) が観測されることが分かった (図 2b)。一方、北米大陸の LAB の下では、特に LAB 分布と異方性との強い相関は見られない (図 2a)。

豪州大陸プレートは、年間約 7cm の速いスピードで北に移動しているのに比べ、北米大陸は約 1cm 程度と低速であり、このプレートの移動速度の違いが、2つの大陸リソスフェア直下のアセノスフェア内に生じるせん断力の違いを生みだし、豪州大陸直下の強い SH>SV の異常の原因となっていることが示唆される。

(3) マルチモード表面波の自動分散解析の検証～高次モード利用時の帯域限界：

非線形波形インバージョンを用いた自動解析によって収集されたモード毎の表面波分散曲線の測定数について、北米および豪州のデータセットを用いて精査した所、どちらの場合も、特に高次モードにおいて、利用可能な周波数帯が、狭い帯域に限られてしまうことが分かった。そこで、理論分散曲線と比較して検証した結果、主に、複数の高次モードの群速度がほぼ一致する周波数帯域において、計測されたデータ数が急減することが明らかとなった。これは、複数の高次モードが地震記録上で重なり、各モードの振幅が相対的に弱まることを意味し、このことが高次モード表面波の利用可能な周波数帯域を狭める原因となることが分かった。これは、高次モードのデータを収集する際の本質的な問題となるが、1～4次程度までの高次モードを利用することで、基本モードと同程度の周波数帯域 (30～200 秒) の情報を利用できる。今後特に、高次モードを用いて上部マントル～マントル遷移層の構造復元を行う際には注意を要する。

(4) 今後の展望：

本研究を通じて、高密度観測網の観測波形記録の解析から、高分解能な減衰構造モデルの復元が十分可能である事が示された。現段階では、高次モードまで含めた3次元減衰構造の復元までは至っていないが、その基礎となる基本モード表面波の減衰係数の試験的な高分解能マッピングや、高次モードまで含めた速度構造モデルの高精度復元と LAB 分布の推定など、今後の更なる3次元速度・減衰構造モデルの発展の礎となる重要な成果を得ることができた。

特に、高密度観測アレイ内における振幅測定が、高分解能な減衰構造分布の復元に有効であることが示された。本研究で得られた結果を基に、今後さらに、2点間または多点間の波形フィッティングによる高次モードの

振幅測定・マッピングへと発展させていく予定である。また、表面波の3次元速度モデルから LAB の空間分布が十分な精度で推定出来ることも示された。特に LAB 直下のアセノスフェアの状態を知る上では、減衰に関する情報も欠かせない。本研究で得られた成果を発展させ、S波速度及び減衰モデルから、大陸及び海洋リソスフェアとその直下のアセノスフェアにおける物質の状態を明らかにすべく、研究を進めることも予定している。

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5件)

- ① Bakirci, T., Yoshizawa, K. and Ozer, M.F., Three-dimensional S wave structure of the upper mantle beneath Turkey from surface wave tomography, *Geophys. J. Int.*, in press, 2012. 査読有。
- ② Fichtner, A., Fishwick, S., Yoshizawa, K. and Kennett, B.L.N., Optimal spherical spline filters for the analysis and comparison of regional-scale tomographic models, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 190-191, 44-50, 2012. 査読有。
- ③ Yoshizawa, K. and Ekström, G., Automated multi-mode phase speed measurements for high-resolution regional-scale tomography: Application to North America, *Geophys. J. Int.*, 183, 1538-1558, 2010. 査読有。
- ④ Yoshizawa, K., Miyake, K. and Yomogida, K., 3-D upper mantle structure beneath Japan and its surrounding region from inter-station dispersion measurements of surface waves, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 183, 4-19, 2010. 査読有。
- ⑤ Bourova, E., Yoshizawa, K. and Yomogida, K., Upper mantle structure of marginal seas and subduction zones in northeastern Eurasia from Rayleigh wave tomography, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 183, 20-32, 2010. 査読有。

[学会発表] (計6件)

- ① Yoshizawa, K., Kennett, B.L.N., Ekström, G., Mapping continental upper mantle with multi-mode surface waves: Case studies for Australia and North America, AGU Fall Meeting, 2011/12/13, Moscone Convention Center (San Francisco, USA)

- ② 吉澤和範, Kennett, B.L.N., Ekstrom, G., マルチモード表面波による豪州及び北米大陸の3次元上部マントル構造の復元, 日本地震学会秋季大会, 2011/10/12, グランシップ(静岡市)
- ③ Yoshizawa, K. and Kennett, B.L.N., 3-D Shear Wave Structure and Radial Anisotropy of Australian Region from Multi-mode Surface Waves, IUGG General Assembly, 2011/7/3, Melbourne Convention and Exhibition Centre (Melbourne, Australia)
- ④ 吉澤和範, Kennett, B.L.N., マルチモード表面波トモグラフィーによるオーストラリア地域の3次元S波速度及び異方性モデル, 日本地球惑星科学連合大会, 2011/5/23, 幕張メッセ(千葉市)
- ⑤ 吉澤和範, マルチモード表面波の自動位相速度計測:大陸地域への応用, 日本地震学会秋季大会, 2010/10/27, 広島国際会議場(広島市)
- ⑥ Yoshizawa, K. & Ekstrom, G., Radially anisotropic shear wave model of North America from multi-mode surface wave tomography using USArray, Japan Geosciences Union, 2010/5/26, Makuhari Messe (Chiba)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉澤 和範 (YOSHIZAWA KAZUNORI)
北海道大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号: 70344463

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし