

平成22年 9月17日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19540448
 研究課題名 (和文) 地下深部物性値を遠地地震波形から直接抽出する：透過波AVO法の実現
 研究課題名 (英文) Direct estimation of deep subsurface material properties from teleseismic waveforms: Transmission AVO
 研究代表者
 竹中 博士 (TAKENAKA HIROSHI)
 九州大学・大学院理学研究院・准教授
 研究者番号：30253397

研究成果の概要 (和文)：

遠地地震の波形記録を用いて地球内部の速度不連続面をマッピングし、その物性値としての地震波速度を抽出する新しい手法の実現へ向けて、最も重要な遠地実体波波形の数値シミュレーションに関わる4課題：(1) 非弾性減衰の導入、(2) 3次元不均質構造の平面波応答計算、(3) 計算精度の向上、(4) 計算の高速化 に取組み、それぞれの解決策となる新しい手法を提案した。

研究成果の概要 (英文)：

We have investigated the following four issues on seismic wave simulations to realize a new technique for mapping of subsurface discontinuities and extract the seismic velocities of the materials at the discontinuities from teleseismic body waveforms: (1) implementation of anelastic attenuation, (2) seismic response of 3D inhomogeneous structure to an oblique plane-wave incidence, (3) numerical accuracy and (4) fast computation. We then proposed new methods as the strategies to resolve the issues.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：地震学

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，地震波，減衰，地球内部構造，地震波動シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

地下構造の探査では、弾性波（地震波）が重要な役割を担って来た。直接目に見ることが出来ない地下深部を人工地震波（弾性波）の反射を利用して探査する地震探査反射法は、地下の石油・天然ガスの探査において最

も一般的に用いられる探査法である。反射法の新しい解析法として普及しつつある AVO (Amplitude Versus Offset) 解析は直接的な地層の物性検知を可能とする最先端の技術である。従来の反射法解析は主に地層の「構造」把握ツールとして、油・ガス田成立に必

要なトラップ構造が存在するかどうかを評価するため、即ち石油・天然ガスが入る「うつわ」があるかないかを調べるために利用されてきた。これに対し、弾性波の反射係数が入射角の関数となる性質を応用した AVO 解析は、地震探査データに含まれる反射波の振幅強度情報を利用することにより、石油・天然ガス貯留層内の物性分布について、より直接的かつ高分解能な情報をもたらす。

反射法探査のように人工振源を用いるアクティブ（制御振源）探査に対して、自然地震を用いた地下（地球内部）構造の探査はパッシブ探査（受動振源探査）と呼ばれている。パッシブ探査は、精度と分解能と点でアクティブ探査にとっても及ぶものではないが、探査深度は桁違いに深い。地震学におけるパッシブ探査で現在最も普及している手法は走時トモグラフィーとレシーバー関数解析の2つである。走時トモグラフィーは、地震波記録の走時（位相情報）のみを利用して、通常波線理論に基づいて地震波速度の水平方向不均質を可視化する方法である。波線理論に基づいているので、原理的に滑らかに速度が変化する長波長の不均質しか同定できない（低分解能）という欠点がある。そのため推定された地震波速度もその絶対値自身には意味が無く、物性値としての速度ではない。一方、レシーバー関数解析は、遠地地震記録の波形を用いて地下の速度不連続をマッピングする手法で、一部振幅情報も使用する。マッピングには従来の反射法探査の技術が導入され、反射法の場合のちょうど「うつわ」構造を再構成することを目的にした方法である。この方法は、分解能が高く、最近世界各地で急速にその利用が流行っている。しかし、レシーバー関数解析も、原理的に物性値としての地震波速度を直接抽出ができない。そこで、レシーバー関数解析のこの欠点を伴わない新しい（レシーバー関数を超える）手法を開発したいというのが本研究の背景・動機である。

2. 研究の目的

上で述べたように、自然地震を用いた地球内部構造の探査はパッシブ探査と呼ばれる。パッシブ探査は、精度と分解能の点で人工振源を用いるアクティブ探査にとっても及ぶものではないが、探査深度は桁違いに深い。パッシブ震源である遠地地震における波形記録を用いて地下の速度不連続面をマッピングし、物性値としての地震波速度を抽出する新しい手法の実現を図ることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

遠地実体波は、観測点下深部では波面がよい近似で平面と見なせ、数学的には平面波入

射の問題として取り扱うことができる。これは、天然のラドン変換である。平面波は、1点の観測のみでも下方接続（数値計算によって波形を地下の任意の深さに戻す操作）できるので、直達平面P波及びそのコーダ波を平面波と仮定することにより、波線に沿った任意の深さで波形を求めることができる。各深さにおいて上昇P波・S波と下降P波・S波に分離し、上昇S波を上昇P波でデコンヴォリューションした量のゼロ時刻の値をその深さにおけるイメージング・コンディションとして地下の不連続面をマッピングできる。そして、その値は理想的には直達平面P波の透過係数に対する透過PS変換波の透過係数の比（これを透過PS変換率と呼ぶことにする）にあたるものである（竹中・他「レシーバー関数を超える：遠地地震波形から直接速度不連続面を同定する方法」I021-003, 2004年地球惑星科学関連学会合同大会）。これはアクティブ探査の反射法において下降P波で上昇P波をデコンヴォリューションしたイメージング・コンディションがPP反射係数、下降P波で上昇S波をデコンヴォリューションしたイメージング・コンディションがPS反射係数に対応するのと同様である。反射法探査ではこのPP、PS反射係数を波形データからたいへん正確に求める手法が確立している。この反射係数の値から物性値としての地震波速度を推定するのが反射波AVO法である。これと同様な手続きで上述の遠地地震の波形記録から推定する透過PS変換率から物性値としての地震波速度を推定するのが本研究で実現を図りたい透過波AVO法である。

透過波AVO法を実際に観測記録に適用して信頼できる物性値を得るためには、実波形記録から透過PS変換率を正確に推定する必要があり、そのためには実記録の下方接続を高精度に行わなくてはならない。現実的な媒質で下方接続するには差分法等による数値シミュレーションに頼らなくてはならない。しかし、それを実現するためには数値シミュレーションにおいて解決すべき以下の4つの課題がある。(1)非弾性減衰の高精度評価、(2)3次元不均質構造の平面波斜め入射問題の数値解法、(3)計算精度の向上、(4)計算の高速化。本研究ではこれら4つの課題の解決に取り組んだ。次節ではそれぞれについてその成果を報告する。実データに適用できる透過波AVO法を実現するためには、得られた成果をさらに総合化していくことが次のステップとなる。これは今後の課題とした。

4. 研究成果

(1) 非弾性減衰を含む媒質の平面波応答計算

鉛直方向に任意に不均質で減衰を有する媒質の3次元(3成分)平面波応答を時間領域

で効率良く計算する計算手法を開発した(下の[雑誌論文]②, [学会発表]⑩他)。鉛直方向に任意に不均質な粘弾性媒質の平面波領域における3次元(3成分)弾性波動方程式を導出し、時間領域差分法で解くスキームを開発した。単純な水平成層構造は、propagator matrix 法などの半解析的手法でも解くことができるが、本手法ではさらに複雑な任意の1次元構造が扱える。本法は、空間1次元の格子しか必要ないので、従来の2次元や3次元の差分法を用いる解法と比べてはるかに効率が良い。また、2次元や3次元の差分法で問題となる計算領域の側方境界からの人工反射波も無い。音響波については、同様の手法がBlanch et al. (1998)で提案されており、本研究はその弾性波への拡張と見ることでもできる。Blanch et al. (1998)では、さらに平面波領域における効率的な音響波形インバージョン法の定式化と実データへの適用結果についても示しており、本研究は彼らの波形インバージョン手法を弾性波バージョンへ拡張する道を拓いたと言える。

Blanch, J. O., W. W. Symes, and R. J. Versteeg, 1998, A numerical study of linear viscoacoustic inversion, in R. G. Keys and D. J. Foster, eds., Comparison of Seismic Inversion Methods on a Single Real Data Set: SEG, 13-44.

(2) 3次元不均質構造の平面波応答のための計算手法の開発

地震波動計算を3次元不均質構造モデルを用いて行うことで高精度のメージングの実現が期待できる。遠地実体波記録のモデリングのためには、3次元不均質構造モデルの平面波入射応答を計算する必要がある、3次元差分法等の数値計算法を用いることになる。しかし、3次元差分法で平面波斜め入射を扱うとき、計算領域の端から強烈な人工反射波が生じるためこれまで実際に使える手法はなかった。そこで、この問題を克服すべく、新しいスキームの開発を行った。この方法は、

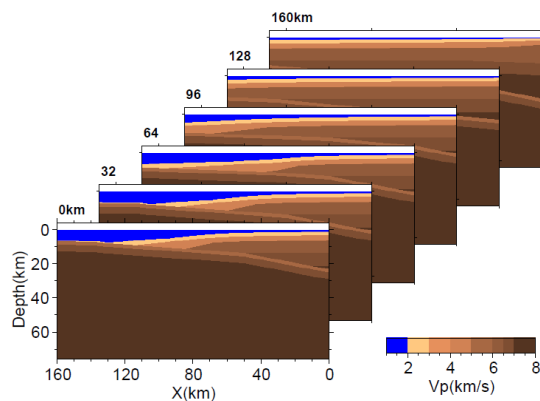


図1. 海溝会合部の3次元モデル。

波動場に2次元のFloquet変換を施して斜め入射平面波の波面を水平にした支配方程式を差分法で解くというものである。入射平面波の波面が水平になると計算領域の側方処理として周期境界条件を課すだけで入射波に直接起因する人工波の発生を回避できる。作成したプログラムは、海や海陸地形も考慮できる(下の[学会発表]①, ④他)。

遠地実体波のシミュレーション例を示す。図1は海溝会合部の構造モデルで、奥行き方向がY軸で、手前側の海溝軸はY軸に平行で、奥側の海溝軸は30度左に向いている。会合部はY=80 km 辺りにある。このモデルの右からY軸に直交する方向にP平面波が深部から入射角25度で入射したときの海底面における計算波形(Transverse成分)が図2である。構造がY方向に変化しない構造モデルでは

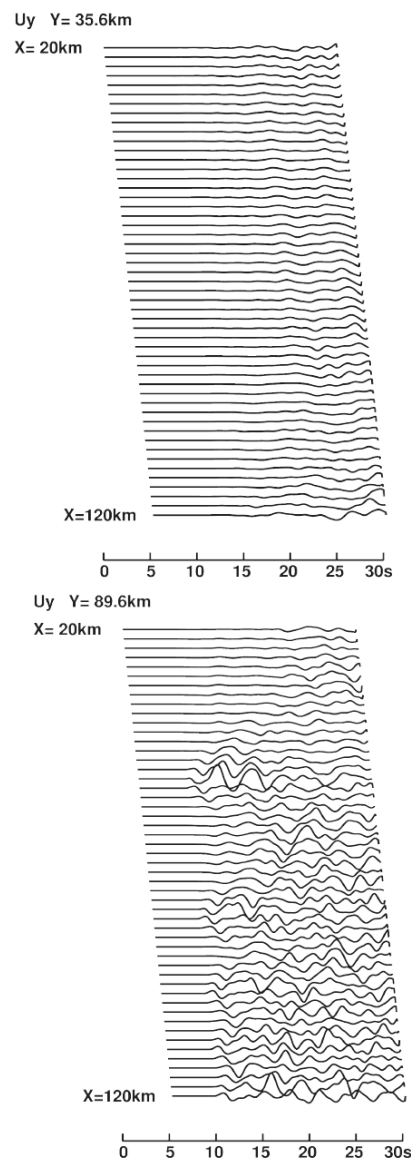


図2. 海底面における計算波形例. Y軸の直交する2測線上のTransverse成分。

この成分は存在しないが、構造の3次元的な不均質の効果でこの成分にも顕著なフェーズが現れている。

(3) 差分オペレータの高精度化

① ノンスタンダード差分法

最近電磁波解析のために開発された高精度の差分オペレータ「non-standard finite-difference」を2次元弾性波動計算(下の[発表論文]③, [学会発表]③, ⑧, ⑨他)及び3次元粘弾性波動計算(下の[学会発表]⑦他)に適用することに成功した。採用した差分スキームは地震学でもっとも良く利用されている空間4次時間2次精度のスタガード格子タイプの差分で、既存のコードに実装することが容易である。これによって、従来のスタガード格子差分オペレータと比べて、特にS波の数値的な格子分散と格子異方性を著しく低減することができた。長距離伝播の計算誤差低減に有効である。なお、現在、このオペレータは点震源用の実装済であるが、平面波応答計算コードへの実装は今後の課題である。

② 局所補間微分オペレータ(IDO)法適用の試み

現在主流のスタガード格子差分法は、格子点の値しか評価していないため格子点間の情報を直接利用することができない。格子点の間に密度や速度の大きな不連続があった場合にはその付近の変位速度、応力など場の量を正確に求めることも難しい。また、地表面においても自由表面条件を実装するために種々の工夫が試みられているが、精度低下をまねている。そこで、このような問題点を解決するため、局所補間微分オペレータ(IDO)法(Aoki, 1997)に基づく高精度地震波動計算スキームの適用について検討した。

IDO法は、格子点の周りの局所空間に注目してその格子点の場の量とその空間微分値から求まる高次のエルミート補間関数を用いて偏微分方程式を離散化して解く数値計算法である。今回試みに1次元構造におけるSH平面波斜め入射問題の解法、同P-SV斜め入射問題の解法、さらに、2次元SH波点震源問題に適用した。通常IDOは格子点の値と微分値(高次微分を含む)から定義した補間多項式を用いているが、我々は微分値ではなく格子点間の積分値を用いて補間多項式を定義した。積分値を用いることは地震波動計算において重要である。なぜなら、媒質の不連続面では応力や変位速度が定義できてもその空間微分値が定義できるとは限らないが、積分値は必ず存在するからである(下の[学会発表]⑩他)。

Aoki, T, Interpolated differential operator (IDO) scheme for solving partial

differential equations, Comput. Phys. Commun., 102, 132-146, 1997.

(4) 波動計算の高速化

GPGPU (General Purpose Graphics Processing Unit) は従来型の高性能計算サーバーにくらべてはるかに低価格でありながら極めて高い演算性能を持つデバイスであり、近年様々な分野に応用されている。本研究で我々は3次元差分法による地震波伝播シミュレーションを高速化する試みとして、GPGPU(NVIDIA S1070)用のプログラムを作成し、単一コア(単一GPU)の場合には従来型CPU(Opteron 2.4GHz)よりも40倍程度の高速な演算ができることを確認した(下の[学会発表]⑤)。また、並列GPU計算のプログラムも作成し、下の[学会発表]②の時点で50GPUで1TFlopsの演算速度を実現した(図3)。現在さらに利用するGPU数を増やしてこの2倍以上の演算速度を実現している。なお、作成コードは全て点震源用であり、平面波応答計算コードへの実装は今後の課題である。

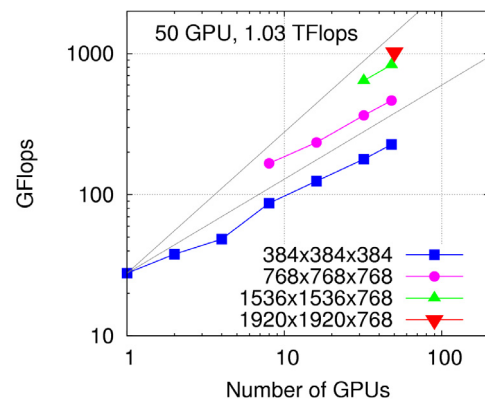


図3. マルチGPUにおける領域サイズと演算性能. 横軸はX, Y, Z各方向の小領域数. 総GPU数をグラフの上に記載.

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3件)

① 竹中博士・中村武史, 横等方的媒質における理論地震記象への非弾性減衰の導入, 北海道大学地球物理学研究報告, 73, 185-194, 2010. (査読有)

② JafarGandomi, A. and H. Takenaka, Three-component 1D viscoelastic FDM for plane-wave incidence, Advances in Geosciences, Volume 20: Solid Earth (SE), edited by Kenji Satake, World Scientific Publishing Company (ISBN : 978-981-283-817-9), Singapore, 299-312,

2010. (査読有)

③ JafarGandomi, A. and H. Takenaka, Non-standard FDTD for elastic wave simulation: two-dimensional P-SV case, Geophysical Journal International, 172(1), 282-302, 2009. (査読有)

[学会発表] (計 2 2 件)

① Takenaka, H., T. Okamoto, T. Murakoshi, and T. Nakamura: FDM Modeling of Teleseismic Receiver Functions for a 3D Trench-Trench Junction Structure, S33B-055, 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan, June 23, 2010.

② 岡元太郎・竹中博士・中村武史: Multi-GPU による地震波伝播計算の高速化, SSS018-04, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉市, 2010 年 5 月 25 日.

③ Takenaka H. and JafarGandomi, A.: Nonstandard FDTD Scheme for Computation of Elastic Waves, Seismological Society of America 2010 Annual Meeting, Portland Marriott Downtown Waterfront, Portland, Oregon, U. S. A., April 21, 2010.

④ Takenaka, H., T. Okamoto, and T. Nakamura: Novel FDTD approach for seismic response of three-dimensionally heterogeneous model to an oblique plane-wave incidence, S43A-1956, American Geophysical Union, 2009 Fall Meeting, The Moscone Center, San Francisco, U. S. A., December 17, 2009.

⑤ 岡元太郎・竹中博士: GPGPU を用いた地震波伝播計算の試み, P3-21, 2009 年度日本地震学会秋季大会, 京都大学吉田キャンパス, 京都市, 2009 年 10 月 23 日.

⑥ Takenaka, H., T. Nakamura, T. Okamoto, and Y. Kaneda: A unified approach implementing land and ocean-bottom topographies in the staggered-grid finite-difference method for seismic wave modeling, 9th SEGJ (Society of Exploration Geophysicists of Japan) International Symposium, Hokkaido Univ., Sapporo, Japan, October 14, 2009.

⑦ Jafargandomi A. and H. Takenaka: Nonstandard finite-difference scheme for three-dimensional viscoelastic waves, S157-P003, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉市, 2009 年 5 月 17 日.

⑧ Jafargandomi, A. and H. Takenaka: Nonstandard FDTD for accurate modeling of seismic wave propagation in 2D, S23A-1880, American Geophysical Union, 2008 Fall Meeting, The Moscone Center, San Francisco, U. S. A., December 16, 2008.

⑨ Takenaka, H. and A. JafarGandomi: Improved nonstandard finite-difference scheme for highly accurate modeling of both of P and S waves in 2D, X3-059, The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Tsukuba International Congress Center (EPOCHAL TSUKUBA), Tsukuba, Japan, November 26, 2008.

⑩ Ohkawauchi, K. and H. Takenaka: Interpolated Differential Operator (IDO) Scheme for Highly Accurate Computation of Seismic Waves, SE91-A017 (SE91-D5-PM1-104-014), Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting, Busan Exhibition & Convention Center, Busan, Korea, June 20, 2008.

⑪ 竹中博士・ジャファーガンドミ アラシユ: 鉛直方向不均質粘弾性媒質における τ - p 領域の波動方程式と時間領域差分法計算, 2007 年度物理探査学会第 117 回学術講演会, 北海道大学, 札幌, 2007 年 10 月 7 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹中 博士 (TAKENAKA HIROSHI)
九州大学・理学研究院・准教授
研究者番号: 3 0 2 5 3 3 9 7

(2) 研究分担者

岡元 太郎 (OKAMOTO TARO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 4 0 2 7 0 9 2 0

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

村越 匠 (MURAKOSHI TAKUMI)
防衛大学校・応用科学群地球海洋学科・
助教

ジャファーガンドミ アラシュ
(JAFARGANDOMI ARASH)
九州大学・大学院理学府・大学院生 (当時)
エジンバラ大学・地球科学部・ポスドク (現
在)