

ランダム波の相互相関関数からのグリーン関数抽出とエネルギー保存則：任意形状の散乱体に関する一般化された光学定理の導出 Green's Function Retrieval from the CCF of Random Waves and Energy Conservation for an Obstacle of Arbitrary Shape

佐藤 春夫^{1*}
Haruo Sato^{1*}

¹ 東北大学, 理, 地物

¹ Tohoku university, Science, Geophysics

ランダム波が等分配状態にあるとき, その相互相関関数 (CCF) からグリーン関数を導出することが可能であり, 地震学においても雑微動解析による構造推定にしばしば用いられてきた. 散乱体が存在するような時, これらを取り囲むようにランダム波の震源が分布する場合 (Wapenaar et al. 2010, Snieder and Fleury 2010) や, 空間に一様に分布している場合 (Margerin and Sato 2011, Margerin and Sato 2011) に, 光学定理が成立することとグリーン関数の導出条件が等価であることが報告されている. 本研究では, 二次元一様速度構造の中に置かれた任意の形状の散乱体 (障害物) と 2 観測点, これらを取り囲む十分大きな円環上に分布するノイズ震源によって照射されている時, その CCF からグリーン関数を抽出するための条件を考察する.

グリーン関数抽出の基本式は 2 観測点におけるランダム波の CCF が遅延グリーン関数の反対称和とノイズ源の自己相関関数のたたみ込みで書かれることであり, これは 2 観測点におけるグリーン関数の積の円環状のノイズ震源の分布について積分がグリーン関数の虚部に一致することと等価である. 座標原点に置かれた任意形状の散乱体の場合, 散乱体の外部におけるグリーン関数の散乱波部分は, 一般に第一種ハンケル関数 (動径成分) と複素指数関数 (角度成分) の級数展開で表すことが出来る. エネルギー流束の円環状の積分を, このグリーン関数の級数展開形を用いて表すと, エネルギー保存則が展開係数に対する拘束式 (一般化された光学定理) として得られる. 一方, グリーン関数の積の角度成分の積分を実行し, 遠方でのハンケル関数の漸近形をもちいると, これはグリーン関数の虚部と残余の項の和で表される. エネルギー保存則から導かれた拘束式は, この残余項をゼロとすることと等価である. すなわち, エネルギー保存則が満たされる場合にはランダム波の CCF からグリーン関数を導くことが可能となり, 具体的なグリーン関数の関数表現は一般化された光学定理の拘束条件を満たさねばならない. この結果は, 三次元空間においても成立することが確かめられる. なお, 2 観測点が散乱体の遠方場にあるという条件がこれまでよく用いられてきたが, 上記証明ではこの条件を用いていない.

Sato, H. 2013. Green's Function Retrieval from the CCF of Random Waves and Energy Conservation for an Obstacle of Arbitrary Shape: Noise Source Distribution on a Large Surrounding Shell, *Geophys. J. Int.* in press.

キーワード: 地震波動, 散乱, 構造解析, グリーン関数, 波動理論

Keywords: Seismic waves, Scattering, structure study, Green function, wave theory

コーダ波の相互相関関数の特徴：震源と観測点ペア間の角度依存性 Characteristics of the CCF of coda waves: dependence on the angle between the station pair and the source

江本 賢太郎^{1*}, カンピーロ ミシェル¹, ブランギエ フローラン¹, ブリアン ザビエ¹, 武田 哲也²
Kentaro Emoto^{1*}, CAMPILLO, Michel¹, BRENGUIER, Florent¹, BRIAND, Xavier¹, Tetsuya Takeda²

¹ 地球科学研究所, グルノーブル大学, フランス, ² 防災科学技術研究所
¹ISTerre, University of Grenoble, France, ²NIED

Coda of earthquakes consists of scattered waves and the late coda can be regarded as a diffuse field. The diffuse wave field is necessary for the seismic interferometry. Campillo & Paul (2003) showed that we can extract the Green's function from field-to-field correlation of coda waves. Different from the noise field, scattered waves around the source region are included in the coda. We analyze the cross-correlation functions (CCF) of coda of earthquakes occurred around the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake and examine the fluctuation of them.

We use the earthquakes with magnitude larger than 5 occurred from 2008 to 2011 and about 74 Hi-net stations located in the east coast of northeastern Japan. We apply the band-pass filter (0.1 - 0.2Hz) and divide the coda window into 300s-long segments from 200s after the origin time until 700s with an interval of overlap of 100s. By stacking the CCFs, we detect the Rayleigh wave with the propagation velocity of 3.2km/s. We examine the dependence on the source location by using the angle between the source and the station pair. The CCFs with angles less than 45 degrees are asymmetry. On the other hand, the CCFs with the angles larger than 45 degrees are more symmetric. This feature was also reported in Paul et al. (2005). This observation indicates that the energy coming from the source is still dominant in the late coda.

We calculate the fractional travel-time change, dt/t , by applying the stretching method to the coda of the CCF and analyze the fluctuation of it. The dt/t shows the strong fluctuation and the RMS of it is about a few percent. This fluctuation is not systematic. The fluctuation of the dt/t measurement based on the stretching method due to the random fluctuation of the waveform is theoretically estimated by Weaver et al (2011). When we apply their theory to our measurement, the predicted fluctuation and the observed fluctuation are the same order of magnitude. This result indicate that the observed fluctuation of dt/t is not reflected the uniform change of the medium. Because the diffuse field of coda is not isotropic, we can't obtain the stable CCF from the coda. We also calculate the CCF of noise field in the same region and calculate the dt/t due to the 2011 Tohoku-oki earthquake by applying the stretching method. We observe the co-seismic change of dt/t . The dt/t increases by about 0.2% after the earthquake. This is one order of magnitude smaller than the fluctuation of dt/t derived from the CCF of coda. Therefore we can't detect the change due to the earthquake from the CCF of coda. In order to improve the stability of the CCF of coda, we apply the curvelet denoising filter (Stehly et al 2011). By the denoising, the correlation coefficient between each CCF and the stretched reference CCF increases and the fluctuation of the dt/t decreases. However, the fluctuation is still too large to detect the co-seismic change.

Finally, we mention about the signal to noise ratio (SNR) of the CCF. The SNR of the CCF of noise is about 3 times larger than that of the CCF of coda. The ratio of the square root of the length of the time window of the noise used to calculate the one-day CCF to that of the coda is about 14. Therefore, in terms of the length of the time window, the CCF of the coda is efficient to extract the Green's function compared with the noise.

キーワード: コーダ波, 地震波干渉法

Keywords: Coda wave, Seismic interferometry

地震波干渉法により減衰構造を求めるための理論的背景

Theoretical background for estimating attenuation structures with seismic interferometry

中原 恒^{1*}

Hisashi Nakahara^{1*}

¹ 中原 恒

¹ Hisashi Nakahara

はじめに

近年、地震波干渉法を用いたパッシブな速度構造の推定が世界各地で行われるようになってきている。地震波干渉法により計算した相互相関関数のフェイズの時刻の読み取りは、ノイズ源の分布に対して比較的口バストであることが知られている(たとえば Snieder, 2004)。一方で、相互相関関数の振幅を用いて減衰構造を推定する手法も提案されているが(例えば, Prieto et al., 2009)が、その安定性に関してはまだ理論的によくわかっておらず、理論的・数値的な研究が進められているのが現状である(例えば, Tsai, 2011)。本研究では、Prieto et al. (2009)が減衰を推定するために、物理的直観に基づき、Aki (1957)のSPAC法の式を減衰性媒質に拡張した予測式について、その理論的な背景を明らかにすることを目的とする。

定式化

本研究では、まず減衰性無限不均質媒質に対して、地震波干渉法の証明を行った。証明の流れは Snieder (2007)と同じであるが、彼が用いている減衰性波動方程式にさらに場に比例する項が付いた別の形の減衰性波動方程式を用いている点異なる。この減衰性波動方程式では、Q値が周波数に比例する形となり、波形は減衰がない場合と同じで振幅のみが減少し、解がとても単純な性質をもつ。速度と減衰が空間的に不均質な場合でも、それを補償するようなノイズ源が体積的に分布する場合には、地震波干渉法が成立することが示された。Snieder (2007)と異なる形の減衰性波動方程式に対しても、地震波干渉法が成立することを具体的に証明したのが本研究の成果である。

次に、この結果を用いて、地震波干渉法とSPAC法との理論的関係式の導出を試みた。SPAC法で重要な規格化されたクロススペクトルでは、分子に2観測点での波動場のクロススペクトル、分母にそれぞれの観測点での波動場のパワースペクトルが現れる。地震波干渉法に基づく、クロススペクトルは2点間のグリーン関数の虚部に比例し、パワースペクトルは震源と観測点と同じ場合のグリーン関数の虚部に比例することになる。すなわち、地震波干渉法とSPAC法との間には理論的関係があり、それを用いると、規格化されたクロススペクトルがグリーン関数を用いて記述できる。

さらに以下では、均質な無限減衰媒質を考えることにする。その場合、減衰性波動方程式に対するグリーン関数は、表面波の場合、周波数領域において、0次の第1種ハンケル関数で表現できる(例えば、今村, 1978)。その際、減衰の影響で波数が複素数になっていることに注意する。この厳密式に対して、(1)減衰が弱いこと、(2)観測点間距離が波長に比べて十分長いこと、の2つの条件を付加すると、Prieto et al. (2009)の予測式を導出できることが示された(Nakahara, 2012)。つまり、Prieto et al. (2009)の予測式は厳密解ではないが、無限均質媒質において、上の2つの条件を満たす場合の近似式であることが明らかになった。

まとめ

本研究では、減衰性無限媒質に地震波干渉法が成立することを証明し、地震波干渉法とSPAC法との理論的関係式を示した。その結果を用いて、Prieto et al. (2009)の式が、無限均質媒質における近似式であることを理解した。最近では、Prieto et al. (2009)の式が減衰トモグラフィーに使用されているが、この式は比較的均質な媒質に適用すべきである。不均質な領域でトモグラフィーを行うことの妥当性はいまだ明らかではなく、今後さらなる理論的な検討が必要である。

謝辞 本研究は、科学技術振興機構の国際緊急共同研究・調査支援プログラム(J-RAPID)による支援を受けました。

キーワード: 地震波干渉法, SPAC法, 減衰

Keywords: seismic interferometry, SPAC method, attenuation

地殻構造探査のためのパッシブサイスミックデータに対する地震波干渉法的リバースタイムマイグレーション

Seismic interferometric reverse time migration to passive seismic data for subsurface structural survey

白石 和也^{1*}

Kazuya Shiraiishi^{1*}

¹(株)地球科学総合研究所

¹JGI, Inc.

(1) 研究の目的

本講演では、自然地震観測記録や環境雑震動などのパッシブサイスミックデータを直接利用して、リバースタイムマイグレーションにより地殻構造を可視化する方法を示す。地震波干渉法は主にデータ領域において利用され、観測に用いた受振点間の仮想震源記録を合成した後に、波形解析やイメージングに用いられるのが一般的である。しかしここでは、地震波干渉法の概念をイメージング過程に導入することにより、パッシブデータを直接利用して実体波による地下の反射面や散乱体のイメージングを行うことを目的とする。工学的社会背景として主要な地下利用分野においてモニタリング調査と称する受動的なデータ収集を行う機会が増える中、パッシブサイスミックデータを有効活用する解析技術の開発は重要である。

(2) 背景となる技術体系

本手法の基礎となる主な技術は「リバースタイムマイグレーション (Reverse Time Migration, RTM)」と「地震波干渉法 (Seismic Interferometry, SI)」である。RTMは物理探査分野において近年の主要なイメージング技術の一つである。RTMは計算コストがかかるものの波動場の再現度が高いため、従来法では対処困難であった複雑な地下構造に対して効果を発揮している。反射法地震探査におけるRTMの原理は、発震点から震源波形を順伝播させた波動場と受振点から受振波形記録を逆伝播させた波動場について、同一時刻の相関を観測時間について積分すること(イメージングコンディション)により地下の反射面や散乱体を結像させることである。RTMのイメージング過程自体は、波動場モデリングツールがあれば比較的容易に実装可能である。

一方のSIは、制御震源記録のリデータミングやパッシブサイスミックデータからの信号抽出などを目的にその活用分野を広げつつある。データ領域でのSIの基本は、地中の震源で励起された地震波が地表の受振点Aへ到達した後、下方へ再伝播し地下の境界面で上方へと反射して別の受振点Bで観測される場合、両者の観測波形記録を相関処理することで点Aを震源として点Bへ伝播する地震波形記録を合成することである。

(3) SI-RTMの実装と数値シミュレーションによる検証

ここで提案するイメージング手法 (Seismic interferometric reverse time migration, SI-RTM) は、RTMによるイメージング過程にSIの概念を導入し、イメージ領域での干渉処理により地下構造を可視化する。SI-RTMでは、通常のRTMにおける順伝播させる震源波形と逆伝播させる観測記録の代わりに、信号を含む任意の時間窓について仮想発震点となる受振点から観測波形記録を順伝播させ受振点側からは観測波形記録を逆伝播させる。すると、データ領域で干渉処理により抽出されるフェーズを考えた場合、一度地表面から下方に伝播した地震波(順伝播波動場)とその波が境界面で反射して別の受振点で観測された波(逆伝播波動場)が反射点でイメージングコンディションを満足し、地下の反射面や散乱体が結像することになる。これは、速度モデルに基づく波動場外挿と地震波干渉処理をイメージ領域で同時に行っていることに相当する。

本研究では、2Dシミュレーションデータを用いてSI-RTMの検証を行った。弾性波動場の有限差分法モデリングにより、(a)近地自然地震観測記録と(b)実体波を主とする環境雑震動を想定した二種類のパッシブサイスミックデータを合成し、テストデータとした。音響波動場のもとで実装したSI-RTMを、それぞれのデータに適用してモデル構造の再現テストを行った。いずれの場合もモデルの再現性は高く、SI-RTMの妥当性を確認できた。

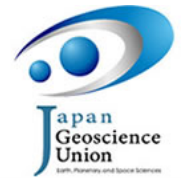
(4) SI-RTMの特徴と課題

本手法に期待される長所は、パッシブサイスミックデータの直接利用に加えて、震源に関わる諸情報が厳密にはわからない場合でも利用できる点である。また、震源や観測点の分布が不均質かつ疎らなときに、データ領域における干渉処理結果ではフェーズの特定が困難で解析の難しいことが多いが、そのような場合にデータ領域(仮想震源記録)とイメージ領域(SI-RTM断面)の双方からのアプローチで解析精度の向上を期待できる。短所は、データ量や対象エリアのサイズによっては計算コストが莫大なこと、事前に速度モデルが必要な点である。後者については、従来法と本手法を組み合わせ速度モデルを構築していく枠組みを今後設計する。その他の技術的課題として、理論的な裏付けや成分記録への対応を行うとともに、実際のパッシブサイスミックデータの解析をする中で現実的な問題は順次解決される。

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS24-04

会場:303

時間:5月20日 09:45-10:00

キーワード: リバースタイムマイグレーション, 地震波干渉法, パッシブサイスミック, 反射法地震探査, 数値シミュレーション

Keywords: reverse time migration, seismic interferometry, passive seismic, reflection seismic survey, numerical simulation

地震波干渉法を用いた東北沖地震に伴う時間変化の解析

Time-lapse changes in velocity and anisotropy after the 2011 Tohoku earthquake estimated by seismic interferometry

仲田 典弘^{1*}, Roel Snieder¹

Nori Nakata^{1*}, Roel Snieder¹

¹コロラド・スクール・オブ・マインズ

¹Colorado School of Mines

東北沖地震から二年間、この地震に起因した地下の速度や異方性の時間変化が推定される中で、地震波干渉法は速度や異方性のモニタリングに有用な手法であると考えられている。我々はこの手法を KiK-net で観測された地震データに適用した。KiK-net は防災科学技術研究所が設置している強震度地震計ネットワークで、全国に 700 ほどある観測点はそれぞれ地表と地中に 1 つずつ受振器がある。地震波干渉法により、地中の受振器を仮想震源とする震源記録を合成することが出来、その仮想震源記録を用いて東北沖地震前後の浅層部の S 波速度をモニタリングした。東北沖地震後二ヶ月間の平均速度は地震前と比べて北東本州全域において約 5% 低下しており、これは他の大地震によって引き起こされた速度変化と比較して広い範囲で速度低下が起こった事を表している。この速度低下は時間とともに一部回復しているが、完全ではない。また、地震波干渉法を用いる事で異方性媒質による S 波分離の強度も推定する事が出来、S 波分離強度の変化についても東北地震前後で検討を行った。この結果、北東本州で、約 10% の S 波分離強度の増加が見られた。

キーワード: 地震波干渉法, 東北沖地震, 時間変化, S 波速度, S 波分離, KiK-net

Keywords: seismic interferometry, Tohoku earthquake, time lapse, shear-wave velocity, shear-wave splitting, KiK-net

海洋リソスフェアを伝わる高周波数 Po/So 波の成因と特性

Computer simulation of high-frequency Po/So propagation in the oceanic lithosphere

古村 孝志^{1*}, ケネット・ブライアン²Takashi Furumura^{1*}, BLN Kennett²¹ 東大情報学環 / 東大地震研, ² オーストラリア国立大 地球科学研究所¹ CIDIR/ERI Univ. Tokyo, ² RSES ANU

本研究では、海洋性リソスフェアを遠地まで良く伝播する実体 P 波と S 波 (Po/So 波) について、その生成と伝播のメカニズムを詳しく調べることを目的に、太平洋海域での海底地震観測データの解析と、不均質なリソスフェアモデルを用いた高周波数地震動の伝播の差分法シミュレーションによる検討を行った。

海域観測点での地震観測において、しばしば高周波数成分 (10~20Hz 以上) に富む、大震幅かつ長いコーダを伴う P 波と S 波が観測される (Po/So 波; Walker, 1982)。Po/So 波は海洋プレート内で発生した浅発地震のほか、スラブ内で発生した深発地震でも見られ、1000~3000km 以上にわたって遠地まで良く伝播する。

これは、海洋リソスフェア (海洋マントル) が低減衰 (High-Q) であるとともに、その内部に短波長で横長の不均質構造 (ラミナ構造) が存在するために、高周波数地震動が強い前方散乱を繰り返し起こし、プレート内部にトラップされるように遠地まで伝えられるためである。加えて、海水層内での P 波の多重反射や、海底面での P-to-S 変換も Po 波や So 波の長いコーダの生成に寄与するものと考えられる。

こうした、High-Q かつ不均質な海洋リソスフェアが Po/So 波の「導波管」として働く効果を確認するために、2 次元差分法を用いて高周波数地震動の伝播シミュレーションを行った。計算領域 1000km × 150km を 0.2km の細かな格子間隔で離散化し、周波数 8Hz までの高周波数地震動の伝播を評価した。海洋リソスフェア・アセノスフェアモデルは、海域の地震波伝播の先行研究として知られる Sereno(1985) のモデルを用いた。このモデルでは、海水層が 4km、堆積層 ($V_s=1.15\text{km/s}$) が 0.5km、海洋性地殻が 5.5km、海洋マントルが 95km の厚さに設定されている。海洋マントルの非弾性減衰 ($Q_s=1000; Q_p=Q_s*2$) は、海洋地殻 ($Q_s=450$) やマントル下のアセノスフェア ($Q_s=225$) より 2~4 倍以上大きく設定されている。

このモデルに対して、短波長不均質構造を、P 波と S 波のランダム速度揺らぎの形で与え、分布関数としては地震波散乱研究で一般的に用いられる von Karman 型の分布特性を与えた。海洋地殻内には、ダイクをイメージした鉛直方向の相関距離 (A_z) が大きな不均質モデル (相関距離 $A_x/A_z=0.5/2.5\text{km}$, 揺らぎの標準偏差 $e=2\%$) を、地殻内 (5/0.25km, 2%) とマントルには (10/0.5km, 2%) にはラミナ構造をイメージした不均質モデル、アセノスフェアには不均質スケールのやや大きなモデル (5/1km, 2%) を与えた。差分法計算は、海洋研究開発機構の地球シミュレータの 16 ノードを用いた並列計算により行った。

まず、海域の地下構造を構成する各要素 (海水、堆積層、地殻・マントル内の不均質性) の効果を調べた。これらを省いたモデルでは、計算から求められた地震波形は P 波と S 波の直達波形と地表・モホ面での反射・変換波から構成されるパルス条の単純な波形である。これに、海水層と堆積層を加えると、海水層内での P 波の多重反射や堆積層内での P 波と S 波の反射・変換が発生し、後続相が生成される。そして、海洋地殻とマントルに短波長不均質構造を導入すると、震幅が大きく長いコーダを持つ Po/So 相が突然現れる。Po/So 相は High-Q かつ不均質の強い海洋アセノスフェアが厚いほど震幅が大きく長いコーダを持ち、また震幅は震源メカニズムに寄らないが、深い地震ほど大きくなることも確認できた。

海洋アセノスフェア内に不均質構造がない場合には、Po/So 波は気が減衰とともに、海洋地殻の Low-Q 値により伝播距離とともに急激に減衰する。ところが、マントル内の短波長不均質構造により高周波数地震動が強い前方散乱を起こすことにより、Po/So の距離減衰は小さくなり、見かけの Q 値はマントル内の High-Q 値相当に大きくなる。

こうした海洋アセノスフェアの高周波 Po/So 波の導波管効果は、各地のプレート毎に大きく異なり (Kennett, Zhao and Furumura, 2009) 特に、本研究で対象とした太平洋プレートは年代が古く (130Ma) 厚い (80km) ために、Po/So の伝播効率が高い。年代が若く厚さの薄いフィリピン海プレートを伝わる Po/So 波 (たとえば, Shito et al., 2012) との比較や、伝播経路に沿いのリソスフェア構造の急変化による So の消失も興味深い。

Elastic waveform modeling in frequency domain with an efficient MATLAB code

Ehsan Jamali Hondori^{1*}, Hitoshi Mikada¹, Tada-nori Goto¹, Junichi Takekawa¹
Ehsan Jamali Hondori^{1*}, Hitoshi Mikada¹, Tada-nori Goto¹, Junichi Takekawa¹

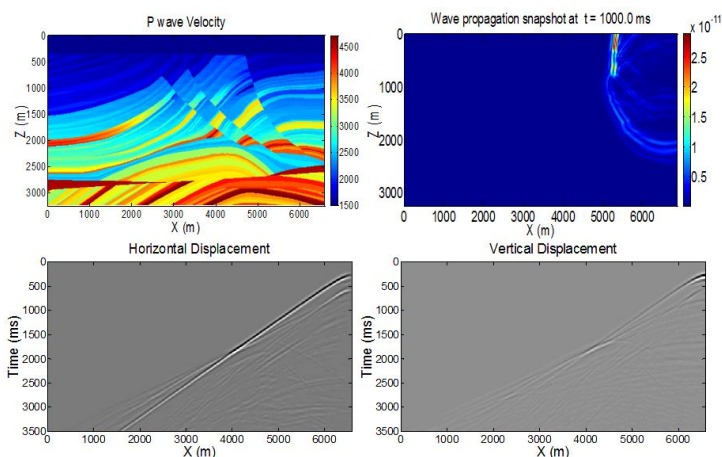
¹Graduate School of Engineering, Kyoto University

¹Graduate School of Engineering, Kyoto University

Seismic waveform modeling is a key tool to estimate subsurface characteristics, not only for hydrocarbon explorations but also for proper managements of seismic hazards and civil engineering infrastructures. Modeling in frequency domain found to be effective for its numerous advantages compared to that in time domain. Once triangular factors of impedance matrix have been calculated, multiple sources can be processed with the minimum computational costs. Monochromatic and band limited modeling at desired frequencies are implemented in a straightforward manner and the attenuation behavior of elastic media can directly be dealt with considering complex valued elastic parameters. However, discretizing the computational domain requires more grid points to achieve acceptable accuracy and a program with robust algorithm is needed to minimize the modeling time and cost. We used 25-point finite difference stencils to discretize the elastic wave equation in frequency domain to develop an effective MATLAB package for elastic waveform modeling. By using array-processing abilities of MATLAB, we efficiently computed the large impedance matrix for realistic model sizes. In order to solve the system of equations impedance matrix is factorized to lower and upper triangular matrixes, then forward and backward substitution results in horizontal and vertical displacements. Since the impedance matrix has a band structure and very sparse pattern, using efficient ordering schemes to reduce fill-in during factorization is necessary. We used METIS library together with SuiteSparse library for sparse LU factorization. METIS uses a multilevel nested dissection algorithm to calculate a fill reducing ordering which brings a superior performance to the program. SuiteSparse includes several factorization and solution modules, such as UMFPACK, SparseQR, and CHOLMOD, for sparse matrixes and linear system of equations. We used UMFPACK and SparseQR modules in our modeling code for problems with different sizes. Once the factors have been calculated, several seismic sources could be modeled by solving for multiple right hand sides. Reflections from truncated boundaries appear in the solution of the wave equation which must be suppressed by boundary conditions. In order to truncate the computational area we applied Perfectly Matched Layers (PML) on the boundaries. Complex valued velocities based on Kolsky-Futterman model were used to consider attenuation effects in the seismic waveforms. Marmousi2 example (Figure 1) confirmed the efficiency and accuracy of the MATLAB code. We have cropped the original model to focus on the more complex area in the center of the geological model; the final model in the example is 6600 m long and 3200 m deep. A snapshot of wave propagation and shot gathers of horizontal and vertical components of the displacement recorded at the surface are shown in the Figure 1. As is obvious in the horizontal displacement component, strong Rayleigh waves appear in the seismograms and travel near surface with low velocity. Based on the results of Marmousi2 example and several other models which have already tested the program, the developed MATLAB package can be used for fast and accurate elastic waveform modeling.

キーワード: seismic, waveform modeling, frequency domain, finite difference, perfectly matched layers

Keywords: seismic, waveform modeling, frequency domain, finite difference, perfectly matched layers



東北地方太平洋沖で発生した地震からの反射 sP 波の振幅分布 Amplitude distribution of sP reflected phase from offshore earthquakes in the Pacific side of Tohoku district

小菅 正裕^{1*}

Masahiro Kosuga^{1*}

¹ 弘前大学理工学研究科

¹ Graduate School of Sci. and Tech., Hirosaki Univ.

We observed a prominent phase on vertical seismograms of interplate and intraplate earthquakes offshore Miyagi prefecture with depth ranges from 30 to 60 km. The phase that appears between P- and S-waves is observed widely at stations in the Japan Sea side. Here we examine the waveform and travel times of this phase using Hi-net data and estimate its origin, and discuss potential usage of the phase.

A polarization analysis indicates that the phase has a strike toward the epicenter, nearly vertical dip angle, and large rectilinearity. This indicates that the phase is P-wave coming from the direction of the source. The travel time of the X-phase is proportional to epicentral distance with an apparent velocity of about 7 km/s. This suggests that the reflection/conversion occurs at relatively shallow part. There is no significant azimuthal variation in arrival times of the X-phase, which implies that the plane of reflection/conversion is nearly horizontal. We estimate the position of conversion/reflection by using ordinary hypocenter location method assuming that the phase is P-wave from the conversion/reflection point. The location is near the surface of the coastal area of Miyagi prefecture. The above observational facts of large amplitude, polarization characteristics, apparent velocity, azimuthal variation of arrival times, and the location of conversion/reflection point, are all consistent with an interpretation that the phase is sP reflected phase from the surface. This phase has already found by previous studies and has been used as a depth phase to improve the depth accuracy in hypocenter location and delineate a seismicity pattern along the plate boundary.

Next we investigated amplitude distribution of sP phase. We measured amplitude on RMS envelope as the deviation of smoothly varying envelope. In many cases the amplitude is largest at stations in Akita and Yamagata prefectures, while the amplitude is smaller at stations in the northern and southern part of Tohoku district, and at stations in the Pacific side. The focal mechanisms of these events are reverse faulting with N-S strike. In the case of reverse faulting earthquake with E-W strike, the area of large amplitude shifts to the northern part of Tohoku district. This indicates that the amplitude distribution of sP phase depends on focal mechanisms. Thus the amplitude of sP phase has a potential usage to determine focal mechanisms of offshore earthquakes, which is difficult from the P-wave polarization only.

Acknowledgement: We thank the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) for providing waveform data from Hi-net.

キーワード: sP 波, 反射, 振幅, 震源メカニズム

Keywords: sP wave, reflection, amplitude, focal mechanisms

塩水粘性が超音波伝播減衰に及ぼす影響 Effect of brine viscosity on ultrasonic wave attenuation

松島 潤^{1*}

Jun Matsushima^{1*}

¹ 東京大学大学院工学系研究科

¹The University of Tokyo

Seismic attenuation is a highly variable physical parameter that depends on confining pressure, porosity, degree of fluid saturation, and variations in fluid properties such as elastic modulus, viscosity, and polarity. In our previous paper, we used partially frozen brine as a solid-liquid coexistence system to investigate seismic attenuation phenomena. Ultrasonic wave transmission measurements on this ice-brine coexisting system were conducted to examine the influence of unfrozen brine in the pore microstructure of ice on ultrasonic waves. From liquid phase to around the freezing point, the presence of a partially frozen brine increases both velocity and attenuation. During the growth of ice from brine, salt cannot incorporate into the ice crystals. As the ice freezes, the salt is rejected and concentrates in the brine; thus, as the salinity increases in the brine filled pores, the freezing point of the remaining fluid is successively lowered and furthermore the viscosity of remaining high salinity unfrozen brines becomes larger and larger. Seismic attenuation related to viscous effect is caused by relative fluid-solid motion is one of the most important attenuation mechanisms. This paper is concerned with the effect of such viscosity on attenuation at ultrasonic frequencies. We observed the variations of a transmitted wave, changing its salinity and quantitatively estimated attenuation for unconsolidated porous material saturated with brine by considering different distances between the source and receiver transducers. The waveform analyses for P-waves indicate that the attenuation increases with increasing salinity (i.e. increasing viscosity). In order to elucidate the physical mechanism responsible for ultrasonic wave attenuation measured at different salinity (i.e. different viscosity), we employ a poroelastic model based on the Biot theory to describe the propagation of ultrasonic waves through partially frozen brines.

キーワード: 地震波減衰, 粘性, 孔隙弾性体

Keywords: Seismic attenuation, viscosity, poroelastic

関東地方で発生するやや深発地震に見られる高周波数地震動の特徴と不均質構造 Characteristics of high-frequency seismic waves during relatively deep event at Kanto region

武村 俊介^{1*}, 吉本 和生¹

Shunsuke Takemura^{1*}, Kazuo Yoshimoto¹

¹ 横浜市立大学

¹Yokohama City University

観測波形に見られる特徴

2005年10月16日茨城県南部の深さ53kmで発生した地震では、同じ関東平野内であっても観測された地震動の特徴が大きく異なる。特に、千葉県中部から南部にかけて観測された2-4Hzの速度記録を見てみると、同じ関東平野内の他の地域に比べてS波の立ち上がりが緩やかで最大振幅の到来時刻も遅くなっている。このような大きな最大振幅の遅れ(ピーク遅延)は、茨城県南部の深さ50~60kmで発生した地震時に千葉県中部から南部において共通して見られる。1Hzを超える高周波数地震動は伝播経路中の短波長の速度のゆらぎによって大きく崩れ、ピーク遅延や継続時間の増大が見られることが知られている(例えば、Sato, 1989)。関東平野下の短波長の速度ゆらぎの空間分布が、局所的なピーク遅延の増大に大きく影響していることが考えられる(例えば、Takahashi et al., 2007)。

本研究では、千葉県中部から南部にかけて見られる大きなピーク遅延の原因を明らかにし、観測記録より得られた特徴を説明できる速度構造モデルを提案する。

2次元差分法による地震動シミュレーション

2次元差分法による地震動シミュレーションによって、高周波数地震動の伝播と不均質構造の関係を調べた。245km×123kmの計算領域を0.015kmで離散化し、4次精度のスタッガード格子の差分法を用いて地震動シミュレーションを行った。

Koketsu et al.(2008)の層構造モデルを用いて2次元の速度構造モデルを構築した。地震波散乱の影響を取り込むために各層に短波長の速度ゆらぎを導入した。速度ゆらぎは指数関数型自己相関関数によって特徴づけられ、上部地殻では相関距離 $a=3$ km、ゆらぎの強さ $e=0.05$ 、下部地殻では $a=3$ km、 $e=0.07$ 、マントルでは $a=10$ km、 $e=0.02$ とした(e.g., Takemura and Furumura, 2013)。海洋プレート内については水平方向の相関距離 $a_H=10$ km、鉛直方向の相関距離 $a_Z=0.5$ km、ゆらぎの強さ $e=0.02$ とした(Furumura and Kennett, 2005)。また、堆積層内については $a=1$ km、 $e=0.07$ を仮定した。これをモデルAとする。

Matsubara et al.(2004)の走時トモグラフィ解析により、千葉県北西部の地下30km程度に局所的に V_s の小さな領域が存在することが報告されている。この領域は震源から千葉県中南部を結ぶ経路上に位置していることから、観測で見られた大きなピーク遅延の原因であると考え、千葉県北西部地下30km付近に低速度領域を加えたものをモデルBとする。また、低速度層内に $a=0.5$ km、 $e=0.10$ のガウス型の自己相関関数で特徴づけられる速度ゆらぎを追加し、2-4Hzの周波数帯における短波長の速度ゆらぎを強化したモデルCとした。それぞれのモデルについて2-4Hzの最大振幅の到来時刻やエンベロープ形状について観測記録と比較を行い、低速度領域や地震波散乱の影響を調べた。

シミュレーション結果

モデルAでは盆地内の地震波散乱やエネルギーのトラップにより、継続時間が長い計算波形となったが、観測で得られたような大きなピーク遅延は見られなかった。千葉県北西部下30kmに低速度層を仮定したモデルBでは、Aに比べると大きなピークの遅延が見られるが観測記録の定量再現には至らなかった。低速度層内に強い速度ゆらぎを追加したモデルCでは、低速度層内での強い地震波散乱により観測で得られたような千葉県中南部での大きなピーク遅延および紡錘形の波形を再現することができた。

千葉県北西部下の低速度域は沈み込む海洋性地殻の脱水作用によるものと解釈されており、強い短波長の速度ゆらぎも流体が関与していることが考えられる。

謝辞

防災科学技術研究所のK-NET/KiK-netおよび首都圏強震動総合ネットワークSK-netの波形記録を使用させていただきました。数値シミュレーションには海洋研究開発機構の地球シミュレータを使わせていただきました。

キーワード: 地震波, 数値シミュレーション, 地震波散乱, 不均質構造

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS24-10

会場:303

時間:5月20日 12:00-12:15

Keywords: seismic wave, numerical simulation, seismic wave scattering, heterogeneous subsurface structure

Hi-net, F-net で捉えた 2010 年 Maule 地震津波による傾斜変動 Tsunami-induced ground tilt changes observed by Hi-net and F-net in Japan

木村 武志^{1*}, 田中 佐千子¹, 齊藤 竜彦¹
Takeshi Kimura^{1*}, Sachiko Tanaka¹, Tatsuhiko Saito¹

¹ 防災科学技術研究所

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

2010 年チリ Maule 地震 (M_W 8.8) 時の津波に伴う傾斜変動が, 日本全国に展開する高感度地震観測網 Hi-net 併設の高感度加速度計 (Kimura et al., 2013, JGR) と広帯域地震観測網 F-net の広帯域地震計の水平成分で観測された。本発表では, 観測された傾斜記録の特徴を明らかにするとともに, その発生メカニズムや津波観測に対する有用性について検討した。

Maule 地震津波時の傾斜変動は Hi-net によって広範囲・高密度に観測され, 太平洋岸付近では $5 \times 10^{-2} \mu\text{rad}$ 程度の振幅を示し, 海岸線からの距離に対してほぼ一定値であった。一方で, 海岸線から 3 km 以上離れると振幅は距離に反比例して減少し, 約 50 km 程度で $5 \times 10^{-3} \mu\text{rad}$ 程度になった。また, 傾斜変動の振動方向は海岸線に直交する方向に卓越していた。さらに同様の変動は F-net 観測点でも観測され, Hi-net 観測点の存在しない島嶼部でも明瞭な記録を得ることが出来た。

観測された傾斜変動やその特徴は, 津波に伴う海面変動によって発生する荷重変形によって説明可能であった。また, 単純な 2 次元ボックスカー型津波モデルを適用し, Maule 地震津波によって海岸線から 14-20 km 以内の範囲に単位海岸線長さ当たり $2-7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{m}$ 程度の海水体積変化が発生した と見積もることが出来た。

海底変動による津波の発生と伝播：線形ポテンシャル理論

Tsunami generation and propagation due to sea-bottom deformation: A linear potential theory

齊藤 竜彦^{1*}

Tatsuhiko Saito^{1*}

¹ 防災科研

¹ NIED

海底変動による津波の発生と伝播過程は、微小振幅を仮定し速度ポテンシャルを利用する線形ポテンシャル理論によって記述できる。特に、海面変動の時空間変化は、これまで数多く研究され、その結果は、2次元津波伝播シミュレーションの初期津波波高分布の設定などにも応用されている。しかし、海中の流速成分の時空間変化に関する数式表現は得られておらず、2次元シミュレーションでの初期流速分布設定に関する理論的根拠は不明瞭であった。本研究では、一定水深のもと任意の時間変化を示す海底変動に対する速度ポテンシャルの数式表現を導出し、さらに、海底での圧力、海中での流速、海面波高の時空間変化の解析解を理論的に導出した。流速分布は、海底変動が直接生み出す流速成分と海面変動を介して間接的に生み出す流速成分の和として表現される。得られた解析解によって、2次元津波伝播シミュレーションの初期流速分布は、海底変動が直接生み出す流速成分をゼロと設定し、間接的な流速成分のみを考慮にいれるべきであると解釈できる。また、海底における水圧は、静水圧と海底変動の運動に伴う動的な圧力変化の和で表され、海底が加速度的に上昇する場合、海底水圧は、動的な圧力変化の効果ぶんだけ大きくなる。このことは、海底水圧計を利用した即時波源規模推定において、注意すべき効果である。

キーワード: 津波, 線形理論

Keywords: tsunami, linear theory