

コーダ波の相互相関解析に基づく散乱波エネルギーの流れの検出

高木 伸昌・佐藤 春夫・西村 太志

(東北大学大学院理学研究科)

E-mail: takagi@zisin.geophys.tohoku.ac.jp

はじめに

不均質媒質中における多重散乱波を用いてグリーン関数を求める手法が、近年提案されている。異なる2点で観測される波の相互相関関数とその2点間のグリーン関数が一致することが、超音波(例えばDerode *et al.*, 2003)や地震波のコーダ(Campillo and Paul, 2003), さらには雑微動(Shapiro and Campillo, 2004)の波形解析結果から分かった。またSnieder [2004]は、弾性波について数理的解釈を行い、正負のラグ各々における相互相関関数がそれぞれ異なる方向に伝播する波を表すグリーン関数に一致することを示した。つまり、相互相関関数の振幅が散乱波エネルギーの大きさに相当すると考えることができ、相互相関解析を行うことで散乱波エネルギーの流れの検出が可能である。本研究では東日本で観測されたコーダ波の相互相関解析により得られた相互相関関数の特徴、特に時間に関する非対称性に注目することで散乱波エネルギーの流れの検出を行った。

相互相関関数

図1に示す東日本におけるF-net観測点の上下動広帯域速度記録を解析に用いた。S波走時の2倍以上となる時刻でコーダ波を100s幅の時間窓に区切っていく。S/Nが2以上ならば、1個の地震から複数の時間窓を取ることを許す。時間に関して振幅減衰を補正した上で、各時間窓の組に対する2点間の相互相関関数を求める。個々の相互相関関数をスタックしたものを、最終的な2点間の相互相関関数とする。

図2は、観測点HROと他の観測点との間の相互相関関数を観測点間の距離ごとに示したものであり、明瞭な波群が見られる。伝播速度が3km/s程度、卓越周期が10s程度であることから、これらの波群はレイリー波である。正負のラグを比較すると、例えばHRO-YMZ間ではより振幅の大きい波群が負の側に見られる。散乱波エネルギーの流れが等方的でないため、相互相関関数が時間に関して非対称になると推測される。

散乱波エネルギーの流れ

正負のラグ各々のピーク値を比べ、大きいピーク値を含む方向へと散乱波のエネルギーが流れると考える。小さいピーク値に対する大きいピーク値の割合を散乱波エネルギーの流れの大きさと見なし、矢印の長さで表す。図3は、観測点の各組ごとに推定した散乱波エネルギーの流れを示したものである。北海道では北西向き、東北と関東では西向きの流れが概ね見られ、前弧側から背弧側へのエネルギーの流れが顕著である。

しかし、解析に用いた地震が前弧側に偏在しているためにこのような流れが生じた可能性がある。そこで、より限られた地域の地震(図4(d))のみを用いた解析を行った。図4(a)(b)(c)は、それぞれ十勝沖、中越、三宅島近海の地震のみを用いた場合のHRO-YMZ間の相互相関関数である。十勝沖の場合、HROからYMZへの流れに相当する負のラグに明瞭な波群が現れる。逆に三宅島近海の場合、YMZからHROへの流れに相当する正のラグに明瞭な波群が現れる。なお中越の場合、明瞭な波群は認められなかった。これらの結果より、震源域に近い点から遠い点への流れが大きいことが確かめられ、解析に用いた地震の偏在が、前弧側から背弧側へのエネルギーの流れを生じさせる原因の一つであることが分かった。

エネルギーの Equipartition

直達波が不均質媒質中に伝播してから十分に時間が経ち、最終的にエネルギーが全方向へ一様に流れる状態をEquipartition状態と呼ぶ。岩石試料を用いた超音波実験では、十分に時間が経つと相互相関関数が時間に関して対称になり、Equipartition状態が得られることが示された(Malcolm et al., 2004)。コーダ波に対する経過時刻と非対称性との関係を調べるため、コーダ波を区切る時間窓の中心時刻に応じて分類し、各時間帯ごとにスタックしたNKG-NOP間の相互相関関数を求めた。十勝沖の地震(図5(e))を用いて解析した結果が、図5(b)(c)(d)である。すべての相互相関関数をスタックした図5(a)と比較しても、これらの相互相関関数からは時間が経つとともに対称になる様子は見られない。よって、これらの観測点付近では波動場がEquipartition状態に達していないと推測される。

まとめ

コーダ波について相互相関解析を行い、レイリー波を検出することができた。得られた相互相関関数は時間に関して非対称となることから、正負のラグ各々でのピーク値を比べ、その比から散乱波エネルギーの流れを推定した。その結果、前弧側から背弧側へのエネルギーの流れが顕著であることが分かったが、太平洋側に地震が偏在していることが主因として挙げられる。また、時間が経っても相互相関関数は対称にならないことから、地震波動の伝播の向きが全方向へ均等に分布しておらず、Equipartition状態に達していないと推測される。

波動場がEquipartition状態になるには平均自由時間の何倍もの時間を要する(Malcolm et al., 2004)。本研究で検出できた波はレイリー波であり、レイリー波の平均自由時間は実体波に比べて長い。そこで、観測点間の距離と震央距離がより短く、短周期に卓越する波を解析し、Equipartition状態に達した波を今後検出していきたい。

参考文献

- Campillo, M., and A. Paul, 2003, Long-range correlations in the diffuse seismic coda, *Science*, **299**, 547–549.
- Derode, A., E. Larose, M. Campillo, and M. Fink, 2003, How to estimate the Green's function of a heterogeneous medium between two passive sensors? Application to acoustic waves, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 3054-3056.
- Malcolm, A. E., J. A. Scales, and B. A. van Tiggelen, 2004, Extracting the Green function from diffuse, equipartitioned waves, *Phys. Rev. E*, **70**, 015601.
- Shapiro, N. M., and M. Campillo, 2004, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L07614, doi:10.1029/2004GL019491.
- Snieder, R., 2004, Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase, *Phys. Rev. E*, **69**, 046610.

謝辞： 防災科学技術研究所による広帯域地震観測網の地震動記録、また、気象庁・文部科学省がデータを処理した震源情報を使用させていただきました。ここに記して感謝いたします。

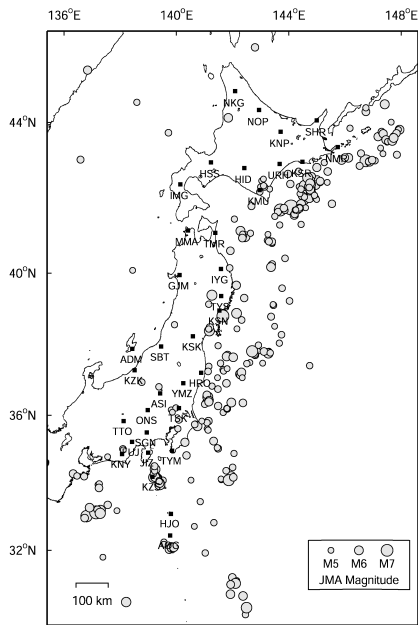


図1 解析に用いたF-net観測点の位置と地震339個の震央分布.

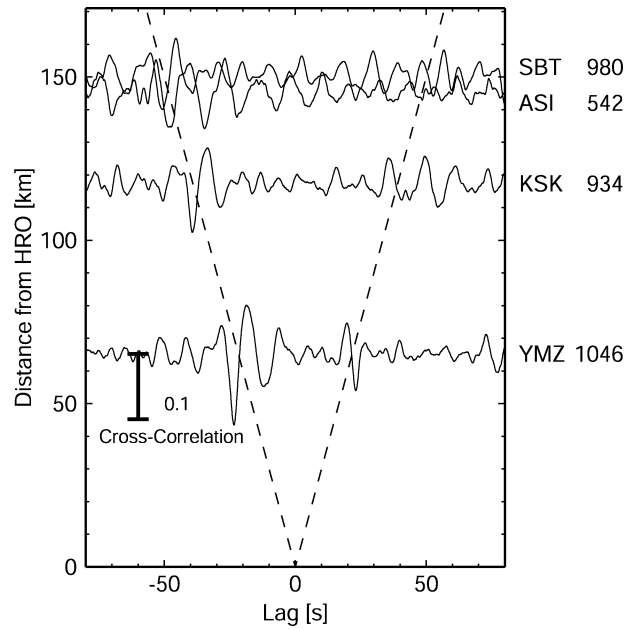


図2 HROと他の観測点との間の相互相関関数. 観測点名(図右)の横の数値はスタック数を表す.

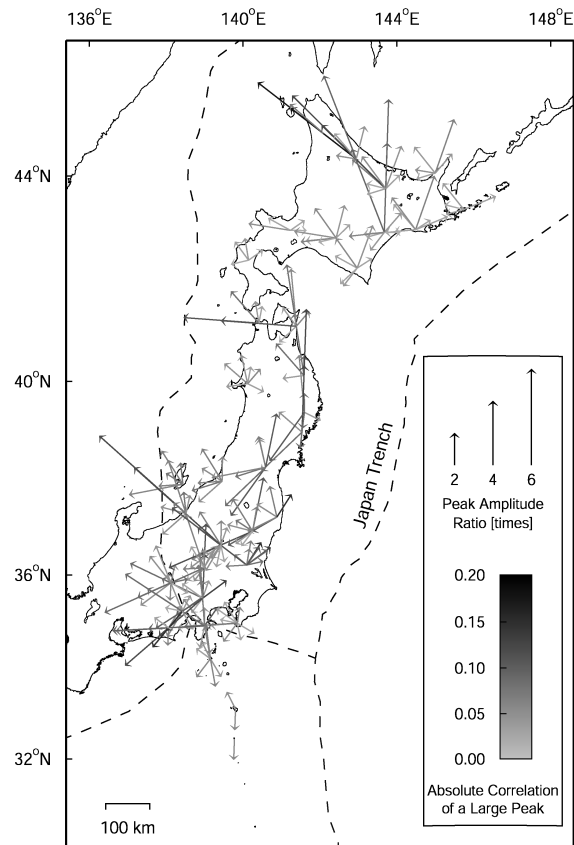


図3 観測点の各組ごとに推定した散乱波エネルギーの流れ. 矢印の方向は流れの大きな方向を示す. また, 長さは小さいピーク値に対する大きいピーク値の割合を示す. グレースケールは大きいピーク値の絶対値を示す.

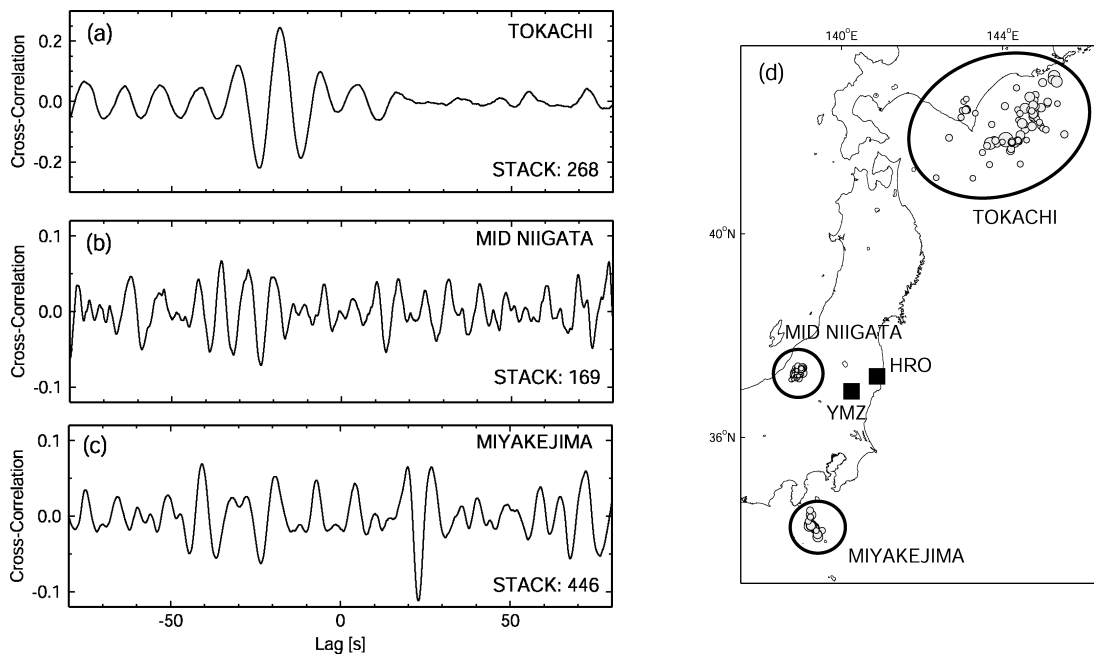


図4 (a)十勝沖, (b)中越, (c)三宅島近海の地震のみを用いた場合のHRO-YMZ間の相互相関関数. 各相互相関関数の右下の値はスタック数である. 正のラグがYMZからHROへの流れ, 負のラグがHROからYMZへの流れにそれぞれ相当する. (d)は観測点HROとYMZの位置, および各地域ごとの震央分布である.

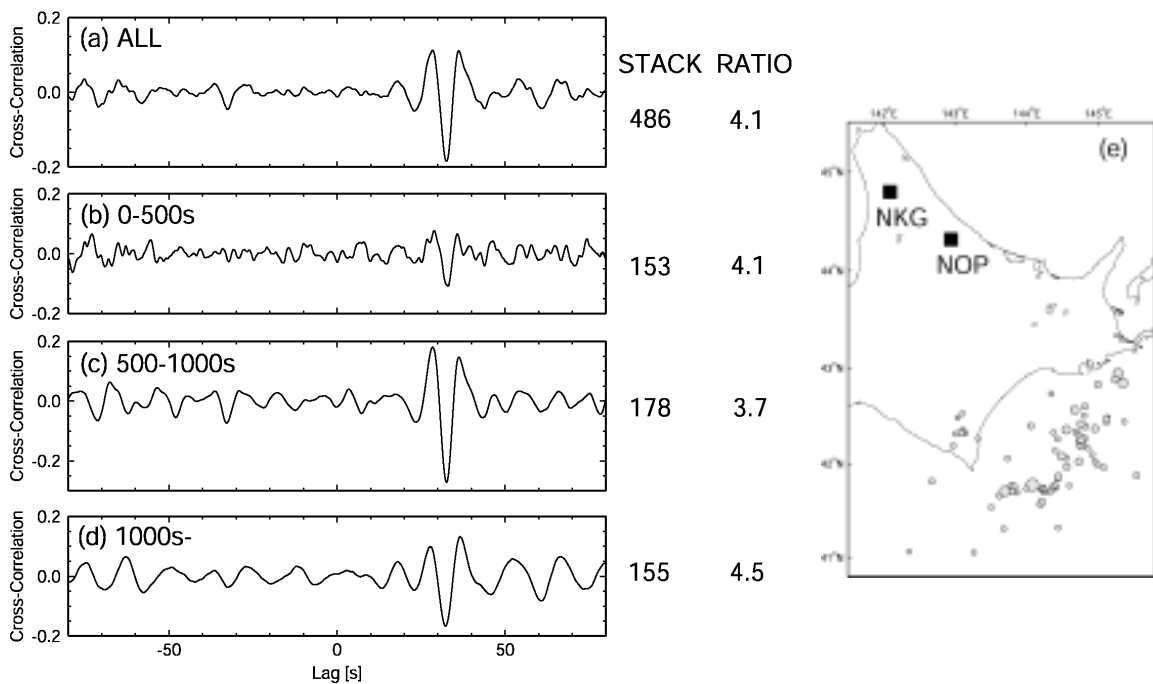


図5 NKG-NOP間の相互相関関数. (a)はすべての相互相関関数をスタックしたものであり, (b)はコーダ波を区切る時間窓の中心時刻が0-500s, (c)は500-1000s, (d)は1000s-の相互相関関数だけをスタックしたものである. 右端の数字は左がスタック数, 右が小さいピーク値に対する大きいピーク値の割合を表す. (e)は観測点NKGとNOPの位置, および用いた十勝沖の地震77個の震央分布である.