

S 波ラディエーションパターンの周波数依存性 -短波長不均質構造による地震波散乱-

武村俊介¹・古村孝志^{1,2}・齊藤竜彦^{1,2}

¹東京大学地震研究所 ²東京大学情報学環総合防災情報研究センター

Frequency-dependence of the apparent S-wave radiation pattern: Seismic wave scattering due to small-scale heterogeneities

Shunsuke Takemura¹, Takashi Furumura^{1,2} and Tatsuhiko Saito^{1,2}
¹ERI, Univ. of Tokyo ²CIDIR, Univ. of Tokyo

1. はじめに

最大振幅の分布や S 波部分のスペクトルの解析などから、S 波のラディエーションパターンは、低周波数側(<1Hz)においてはダブルカップルモデルから予測されるような 4 象限型のパターンを示すが、周波数の増大に伴い崩れ、高周波数側(>3Hz)では等方的なパターンを示すことが指摘されている[e.g. Liu and Helmberger, 1985; Satoh, 2002; Takenaka et al., 2003]。この様なラディエーションパターンの周波数依存性の原因として、震源の効果(震源過程の複雑さ)、伝播経路の効果(伝播経路中の不均質な構造)、サイトの効果(ごく浅い部分の強い不均質)が影響していると考えられている。

本研究では、2000 年鳥取県西部地震の本震及び余震の KiK-net の強震記録を用い S 波ラディエーションパターンの解析を行った。解析を行った結果、震源距離が大きくなるほどラディエーションパターンの崩壊が大きく、さらに周波数が高いほど影響が強いことから、伝播経路中の不均質が強く影響していることを明らかにした。また、2次元の FD シミュレーションを行い、地殻内の不均質がラディエーションパターンを崩壊させる過程を調査した。

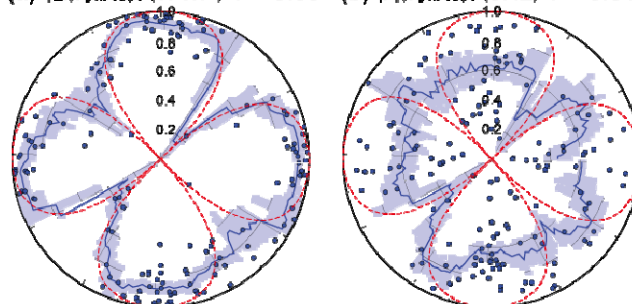
2. 解析手法

2000 年鳥取県西部地震の余震の中で F-net の CMT 解が横ずれ断層であるような 29 の余震の KiK-net の強震波形を用い解析を行った。東西・南北の加速度記録を Radial 及び Transverse に変換し、S 波の理論走時より 5 秒を S 波部分とし、 $A_T = T/\sqrt{R^2 + T^2}$ を計算した。 R と T はそれぞれ、Radial 及び Transverse 成分の S 波部分の最大振幅値であり、 A_T は水平動中の Transverse 成分の強さを表す。それらを断層の走行方向を基準として、プロットしたのが図 1 である。薄い青の部分は平均の推定誤差である。低周波数(0.5Hz)では、理論的に推定されるラディエーションパターンと移動平均がよく一致しているが、高周波数(5Hz)となると、理論的に推定される曲線とは異なり、方位に依らず同程度の振幅となっていることが分かる。

ラディエーションパターンの崩れを定量化する為に、SH 波のラディエーションパターンの理論分布と観測から得られた A_T の移動平均との間で相関係数 r を計算する。図 1 を見ると、低周波数では $r=0.65$ と比較的高い値であるのに対して、高周波数では $r=0.013$ となる。

以下、この相関係数を用い、29 個の余震、計 563 の波形データを周波数毎に解析を行い、周波数の増大に伴い、ラディエーションパターンが崩れていく様子を調べた。また、大量の余震記録を、マグニチュード、震源距離、地中と地表を用いてわけて解析をすることで、周波数依存性の原因を調べた。

(a) 低周波数 (0.5Hz) $r = 0.65$ (b) 高周波数 (5Hz) $r = 0.013$



● 鳥取県西部地震(観測) — 移動平均 - - - 理論輻射特性

図1 S波の放射振幅の空間分布(低周波数、高周波数)

3. 解析結果

図2は、震源距離100km以内のデータを用いた相関係数の周波数変化のグラフである。地中記録(図2赤い実線)及び地表記録(図2青い破線)から得られた相関係数は、ともに、低周波数側では比較的高い値($r=0.3-0.5$)を示すが、周波数の増大に伴い相関が小さくなり、5Hz以上の高周波数領域では、ほとんど無相関となり、等方的なラディエーションパターンを示すことが分かる。また、地中及び地表の相関係数を比べると、3Hzより高い周波数帯では顕著な差は見られない。このことから、高周波数でのラディエーションパターンの崩れに対して、サイトの効果は相対的に小さいことが示唆される。

図3は、余震記録を震源距離によって分割しそれぞれについて相関係数を求めたもので、距離とともにラディエーションパターンの崩壊の様子を調べたものである。2-4Hzの周波数帯(図3青線)では、距離の増大に伴い相関が低くなっている。また、さらに高い周波数(図3赤線)では、震源距離の増加に伴う相関係数の低下が著しい。これらのことから、地殻内の短波長不均質構造における地震波散乱が、ラディエーションパターンの崩壊に大きく影響していることが示唆される。このほかにも、震源の不均質性の影響考えられ、今後の課題とする。

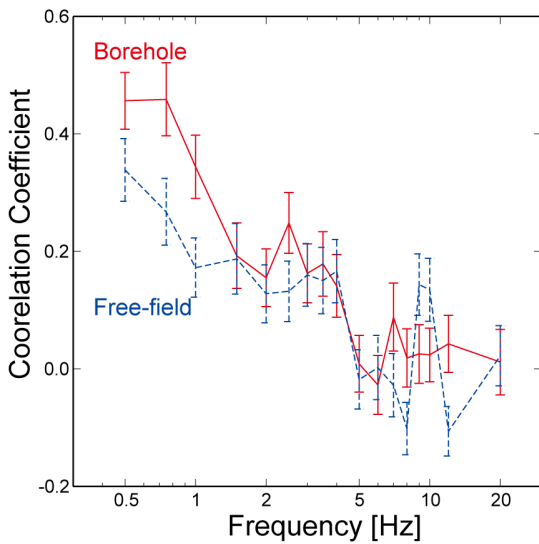


図2 周波数の増大に伴うラディエーションパターンの崩壊

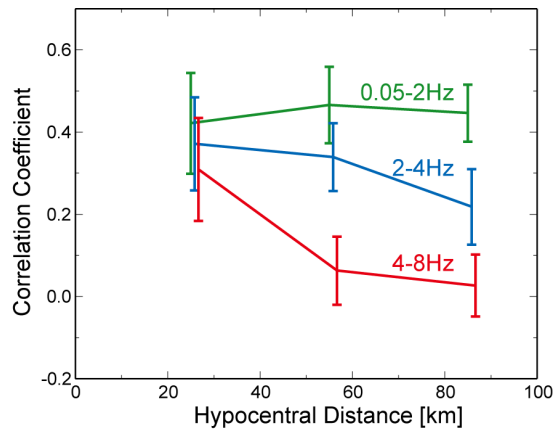


図3 距離の増大に伴うラディエーションパターンの崩壊

4. FDM simulation

2次元の地震動シミュレーションにより、短波長不均質構造がラディエーションパターンに及ぼす影響を調べた。

計算領域 $256\text{km} \times 256\text{km}$ を格子間隔 0.05km で離散化し、4次精度の staggered grid FDM コードを用いて弾性波の計算を行った。地殻内の短波長不均質構造を、地震波速度構造を $V(x) = V_0\{1 + \xi(x)\}$ としてランダムな揺らぎを与えることで合成した。ここで、 V_0 は地殻内の平均的な地震波速度で、 $\xi(x)$ は速度構造の揺らぎを表す。揺らぎ $\xi(x)$ は波数領域において指数関数型のスペクトルで表現され、空間的な変動スケールを表す相関距離 a と、揺らぎの強度を表す分散 ε^2 で特徴づけられる。

図4に、均質媒質と短波長不均質構造($a = 5\text{km}$, $\varepsilon = 0.07$)における地震波動伝播の様子を示す。均質媒質中(図4(a))では、断層とそれに直行する方向に対して強いS波が伝播し、45度傾いた方向では、S波振幅がない節となっている。それに対して、不均質媒質中(図4(b))では地震波散乱により節が不鮮明となり、ラディエーションパターンが崩れている。2つの波動伝搬のスナップショットの比較から、短波長不均質構造がラディエーションパターンの崩壊に大きく寄与していることがわかる。

以下、相関距離 a と分散 ε を様々に変え、相関係数を計算し、観測と比較することにより、地殻内の不均質構造のスケールを考えた。

相関距離 a と分散 ε を変え、これらのパラメータがラディエーションパターンに与える影響が明らかにした。まず、分散 ε を強くすると、相関係数が全周波数帯で低下するが、周波数の増大に対する

相関係数の減衰の傾きは変化しないことがわかった。次に、相関距離 a は周波数に対する相関係数の減少の傾きに影響し、短い相関距離の不均質媒質では、周波数が増大すると急激に相関係数が減少することがわかった。

最も観測から得られた相関係数とよく一致を示したモデル($a = 3\text{km}$, $\varepsilon = 0.07$, $\kappa = 0.5$)の計算結果を図5に示す。このモデルにより、ラディエーションパターン崩壊の周波数依存性も高周波数の距離依存性もよく再現することができた。

現実的な地下構造は3次元的に不均質であり、なおかつ非等方なランダム媒質(鉛直方向の相関距離が短い)を持つ可能性がある。今後、3次元の地震動シミュレーションを行い、2次元の場合及び非等方なランダム媒質の場合との比較をすることが重要である。

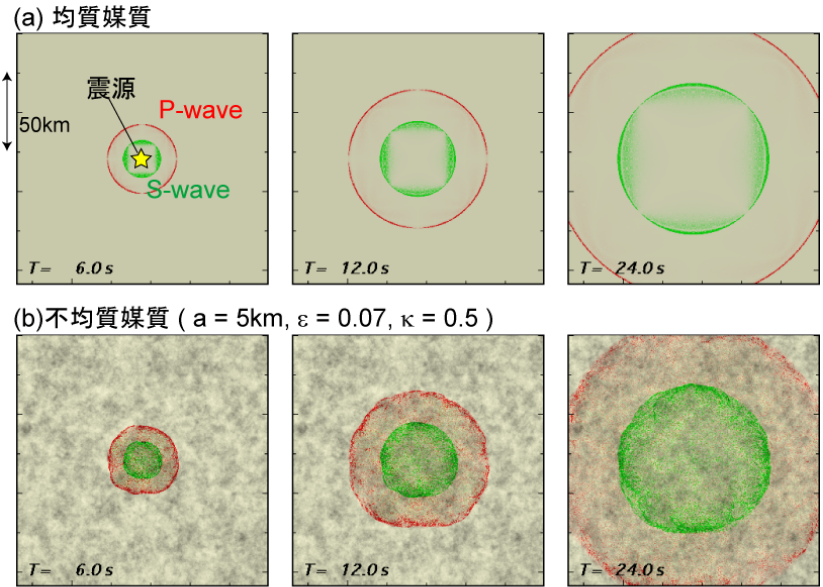


図4 均質媒質(a)及び不均質媒質中(b)の地震波動伝播の様子

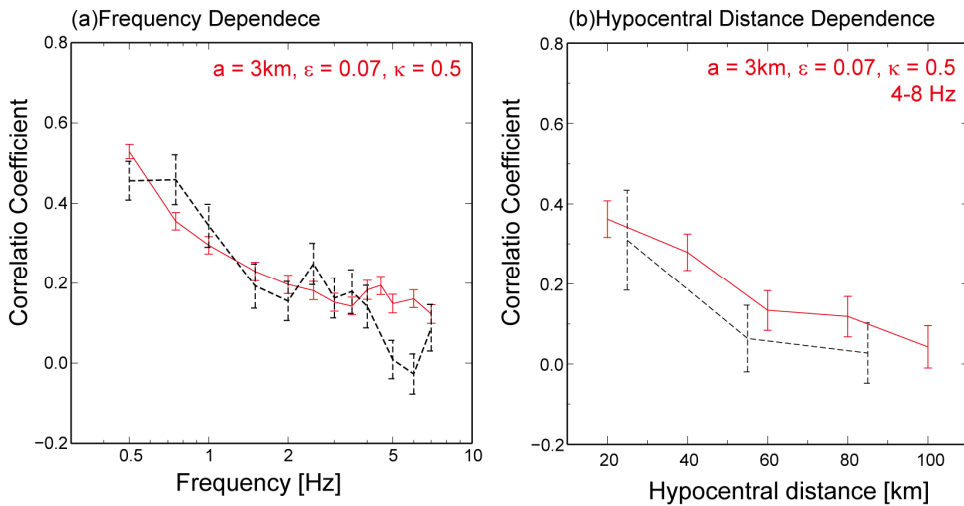


図5 計算結果と観測より求められた相関係数の比較

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所(NIED)のKiK-netの強震記録及びF-netのCMT解を使わせていただきました。また、地震動計算には、海洋開発研究機構(JAMSTEC)の地球シミュレータを使わせていただきました。記して感謝いたします。