

KiK-net伯太観測点における2000年鳥取県西部地震後の浅部S波速度構造の時間変化

澤崎郁・佐藤春夫・中原恒・西村太志

(東北大学大学院理学研究科)

はじめに 従来、大地震発生に伴う地殻の地震波速度変化に関する研究の多くは、断層帯近傍における速度変化に着目したものであった。しかし、近年になって、断層帯ではなく強震動を受けた地盤浅部における顕著な速度変化を検出した例が報告されてきており (Rubinstein and Beroza, 2004, Peng and Ben-zion, 2006)、速度変化が生じる場所の特定が求められている。われわれはこれまでに、コーダ波スペクトル比法および相互相関関数法を地中 (ボアホール坑底) と地表で得られた記録に適用することで、強震後の地盤特性の時間変化を検出してきた (Sawazaki et al., 2006)。今回新たに、KiK-net 伯太 (SMNH01) 観測点における地中と地表記録のコーダ波スペクトル比と相互相関関数のピーク遅延時間を理論的に計算し、その結果を観測値と比較することにより地盤浅部の S 波速度構造の時間変化を推定したので、結果を報告する。

データ・解析手法 2000年鳥取県西部地震 (06/10/2000, M_w 6.7) により 844 gal の水平最大加速度を記録した KiK-net 伯太 (SMNH01) 観測点 (ボアホール孔底の深さ 100m) の加速度記録を解析に用いた。図 1 に、伯太観測点の位置と使用した地震の震央を示す。各地震記録について、S 波走時の 2 倍となる時刻から 10.24 秒間を切り出し、地表と地中記録の加速度振幅スペクトル比を計算した。S 波走時が 10 秒以下の場合には、震源継続時間の影響を考慮して、S 波到達時の 10 秒後から波形を切り出した。本震記録については、S 波到達の 50 秒後から 280 秒後までの記録の中で顕著な余震記録が含まれていない部分を切り出した。得られた加速度振幅スペクトル比の対数平均を期間 (本震前、本震 S 波到達の 50-280 秒後、本震の 0-10 日後、10-100 日後、100-1000 日後、1000 日後以降) ごとに計算し、その時間変化を調べた。相互相関関数については、1-16 Hz のバンドパスフィルタをかけた後、S 波走時の 2 倍となる時刻から 2 秒間の波形を 2 秒ごとに 5 本切り出し、その相互相関関数の平均を計算した。得られた相互相関関数を期間ごとに平均し、その時間変化を調べた。

振幅スペクトル比と相互相関関数の時間変化 図 2 の(a)と(b)に、コーダ波の加速度振幅スペクトル比と相互相関関数の時間変化をそれぞれ示す。伯太観測点における加速度振幅スペクトル比の基本モードのピーク周波数は、本震前には 4.5 Hz であった。本震の S 波到達後 0-10 秒においては、加速度振幅スペクトル比は高周波側で低下し低周波側で上昇する。この時間帯での地表加速度は、非線形応答を示すといわれる 100gal 程度を大きく超えているため、加速度振幅スペクトル比の変化は非線形応答によるものであると考えられる。S 波到達の 50-280 秒後には、スペクトル比のレベルはほぼ本震前の値まで回復しているが、ピーク周波数は 4.0 Hz であり、本震前と比較して 10% 以上低下している。この時間帯における地表加速度は 30gal 以下であり、非線形応答が生じているとは考えにくい。したがって、ピーク周波数の低下は非線形応答によるものではなく、地盤の性質の長期的な変化が現れたものであると考えられる。その後、ピーク周波数は 1 年以上かけて本震前の値までほぼ回復した。コーダ波の相互相関関数のピーク遅延時間は、本震前には 0.09 秒であった。本震の S 波到達後 0-10 秒においてはピーク遅延時間が大きく上昇しているが、これは非線形応答により速度低下が生じたためと考えられる。S 波到達の 50-280 秒後のピーク遅延時間は 0.107 秒であり、非線形応答が生じていないと考えられるにもかかわらず、本震前に比べて 10% 以上上昇している。その後、ピーク遅延時間は 1 年以上かけて本震前の値までほぼ回復した。

S 波速度構造の推定法 観測された加速度振幅スペクトル比および相互相関関数の時間変化は、地表と地中観測点間の S 波速度構造の時間変化を反映していると考えられる。そこで、図 3 に示すように、水平成層構造に対し SH 波と SV 波が等方ランダムに入射する状況を仮定してコーダ波の振幅スペクトル比と相互相関関数のピーク遅延時間を計

算し、観測値との比較から期間ごとのS波速度構造を推定した。地中観測点に対し角度 J_k で入射する波のスペクトルを $A_k(f)$ 、地中—地表間の透過応答関数を $T_k(f)$ 、反射応答関数を $R_k(f)$ とすると、地表と地中におけるスペクトル $S(f)$ 、 $B(f)$ は、それぞれ

$$\begin{aligned} S(f) &= \sum_k [A_k(f)T_k(f)] \\ B(f) &= \sum_k [A_k(f)R_k(f)] \end{aligned} \quad (1)$$

と表される。ここで、コーダ波の性質として地中観測点に対する等方入射を仮定すると、入射波スペクトルは

$$A_k(f) = A(f) \exp[i\phi_k(f)] \quad (2)$$

と表すことができる。ここで $A(f)$ は入射波の振幅スペクトルを、 $\phi_k(f)$ は入射波の位相スペクトルを表す。ここで、入射波の位相がランダムならば、地表と地中の振幅スペクトル比 $G(f)$ は

$$G(f) = \left| \frac{S(f)}{B(f)} \right| = \sqrt{\frac{\sum_k \{T_k(f) \exp[i\phi_k(f)]\} \sum_{k'} \{T_{k'}^*(f) \exp[-i\phi_{k'}(f)]\}}{\sum_k \{R_k(f) \exp[i\phi_k(f)]\} \sum_{k'} \{R_{k'}^*(f) \exp[-i\phi_{k'}(f)]\}}} \approx \sqrt{\frac{\sum_k |T_k(f)|^2}{\sum_k |R_k(f)|^2}} \quad (3)$$

と近似することができる。今回は、Silva (1976) による伝達行列法と (3) 式を用いてコーダ波の振幅スペクトル比を計算した。コーダ波相互相関関数のピーク遅延時間 T については、地表と地中間のS波走時の入射角平均を波線理論に基づいて計算することで見積もった。S波速度構造の探索には遺伝的アルゴリズムを用いた。本震前については、各層のS波速度 V_S (m/s) を検層結果の0.8倍から1.2倍の範囲で探索し、本震後の各期間については、本震前について得られたS波速度の0.2倍から1.2倍の範囲で探索した。P波速度 V_P (m/s) と層厚は防災科学技術研究所による検層結果 (図4) に固定し、Q値は $Q_P=Q_S=0.008 \cdot V_S f$ (Kobayashi et al., 1989)、密度は $\rho=310 \cdot V_P^{0.25}$ (kg/m³) (Gardner et al., 1974) として計算した。インバージョンの目的関数には、

$$\text{Misfit} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L [\log G_{OBS}(f_i) - \log G_{CAL}(f_i)]^2 + W(\log T_{OBS} - \log T_{CAL})^2 \quad (4)$$

という式を採用した。ここで添え字の OBS, CAL はそれぞれ観測値、計算値を示す。右辺第2項にかかっている係数 W は、振幅スペクトル比とピーク遅延時間の相対的な重みの与え方であり、今回は $W=1$ の場合の結果を示す。

S波速度構造の時間変化 はじめに1-10 Hzの帯域を用いて本震前におけるS波速度構造の推定を試みたところ、約5Hz以上の帯域において振幅スペクトル比を合わせるができなかった。この理由としては、観測小屋の固有振動数が地表のスペクトルに現れている可能性 (日比野・他, 2003) や、高周波では水平成層構造の仮定が成り立たない可能性などが考えられた。そのため、本研究では1-5Hzの帯域のみを振幅スペクトル比のフィッティングに用いることにした。推定されたS波速度構造の時間変化を図5に示す。各シンボルに付随する縦棒は、遺伝的アルゴリズムの初期パラメータを変えて5回試行した結果のばらつきを示し、シンボルは5回の試行結果の平均値を表す。本震のS波到達の50-280秒後には、地表からの深さ0-4 m (第1層) において60%以上の速度低下が生じている。一方で、その他の深さでは顕著な速度低下は見られない。0-4 m におけるS波速度は本震後の時間経過とともに上昇し、1000日以上経過した時点で本震前の80%まで回復した。図6に、(a) 本震後50-280秒における振幅スペクトル比と、(b) ピーク遅延時間の計算値と観測値の比較を示す。赤で示した振幅スペクトル比は、5回の試行のうち(4)式のみスフィット値が最小の場合の結果を示す。1-5Hz においては、振幅スペクトル値の計算値は観測値とよく合っている。ピーク遅延時間の計算値も、観測されたピーク遅延時間の増加と回復の傾向をおおむね説明できている。

まとめ KiK-net 伯太観測点における、2000年鳥取県西部地震前後の地盤浅部S波速度構造の時間変化を推定した。コーダ波振幅スペクトル比のピーク周波数は、本震後に本震前と比較して10%以上低下し、その後1年以上かけて本震前の値までほぼ回復した。コーダ波相互相関関数のピーク遅延時間は、本震後に10%以上増加し、その後1年以上かけて本震前の値までほぼ回復した。コーダ波の振幅スペクトル比と相互相関関数のピーク遅延時間の計算値を観測値と比較することにより、地盤のS波速度構造の時間変化を見積もった。その結果、本震直後に特に地盤浅部にお

るS波速度が低下し、その後1年以上かけて回復することにより、観測された時間変化をおおむね説明できることが分かった。

謝辞：本研究では防災科学技術研究所のKiK-netの記録を使用させていただきました。記して感謝いたします。

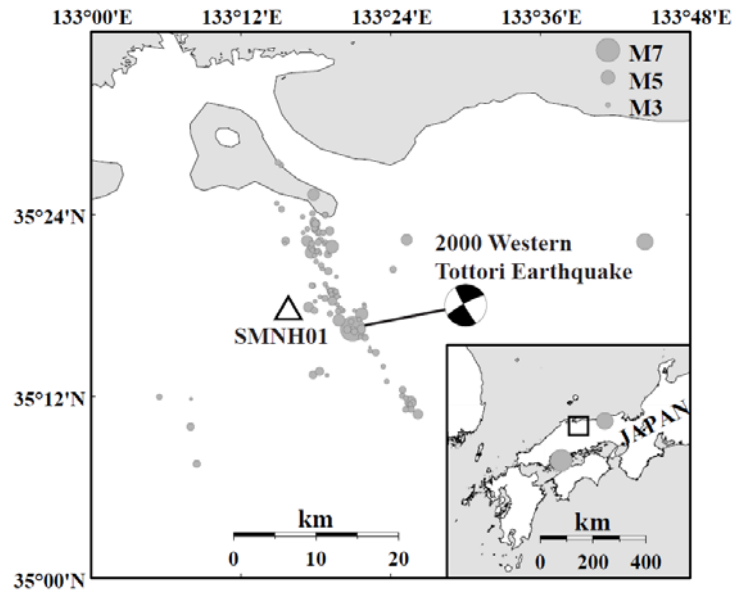


図1. KiK-net 伯太 (SMNH01) 観測点の位置 (三角) と解析に用いた地震の震央 (丸).

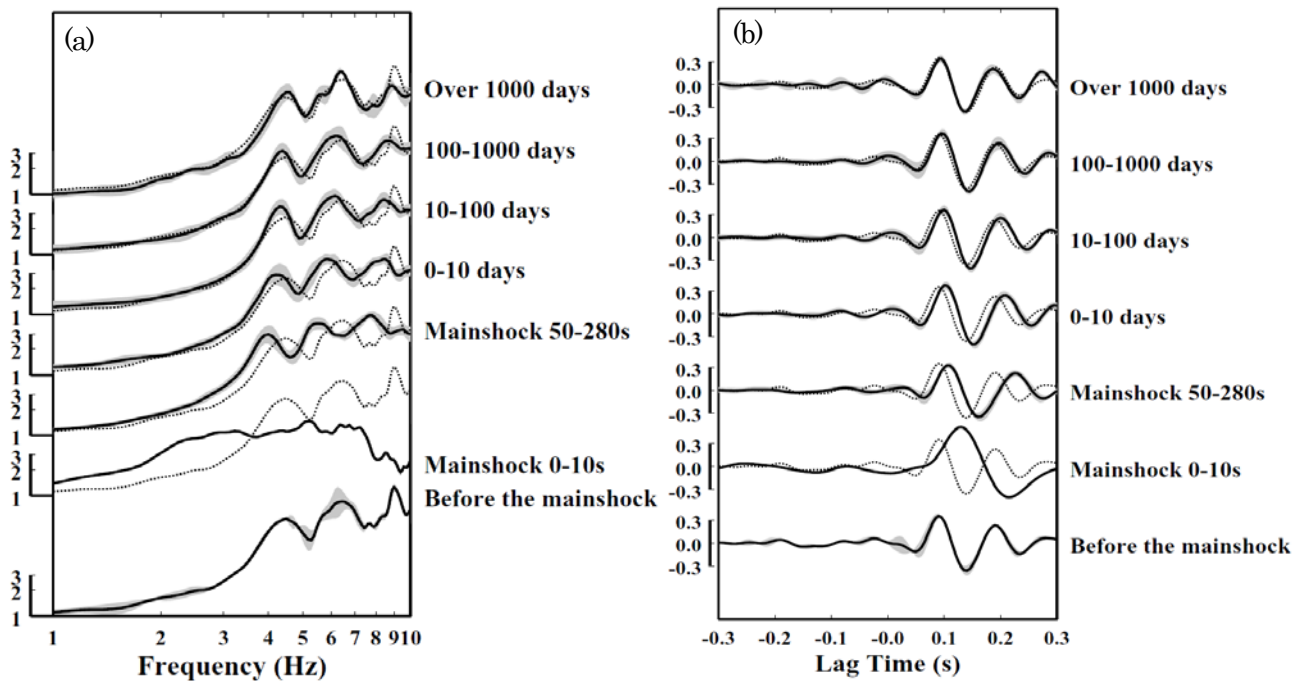


図2. 伯太観測点におけるコーダ波の (a) 振幅スペクトル比と (b) 相互相関関数の時間変化. 各図の右横に、解析に用いた地震が発生した期間を本震からの経過時間で示す. 点線は本震前での結果を示す. 灰色は解析期間内での標準偏差を表す.

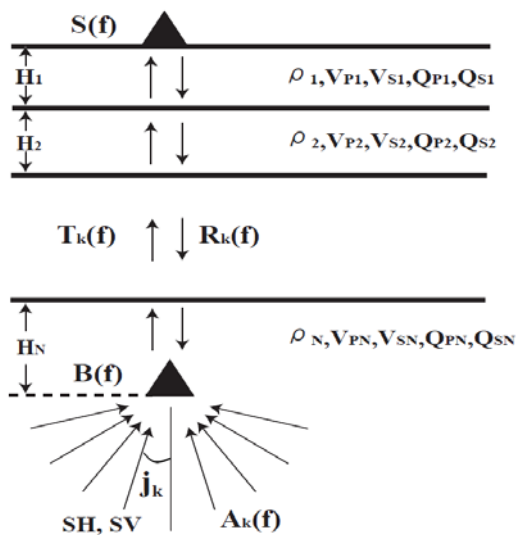


図 3. 水平成層構造に対し、等方ランダムに SH 波と SV 波が入射する様子の模式図。

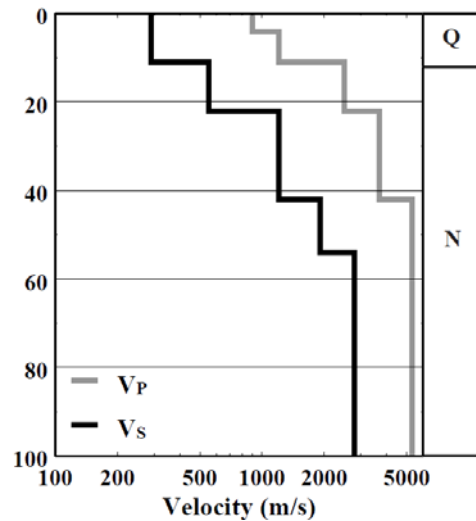


図 4. 伯太観測点における検層結果. Q は第四紀層, N は新第三紀層を表す.

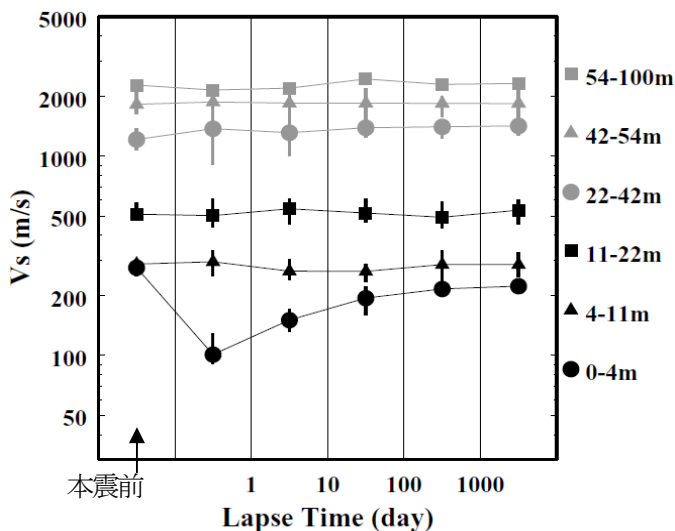


図 5. 伯太観測点における S 波速度構造の時間変化. 横軸に本震からの経過時間, 縦軸に S 波速度をそれぞれ対数軸で示す. 図の右横の数字は, 地表から地中観測点までの各層の深さを表す. 各シンボルに付随する縦棒は, インバージョンを 5 回試行したときの結果のばらつきの範囲を表す.

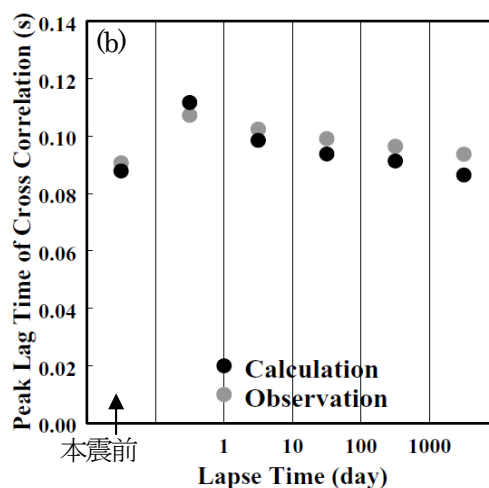
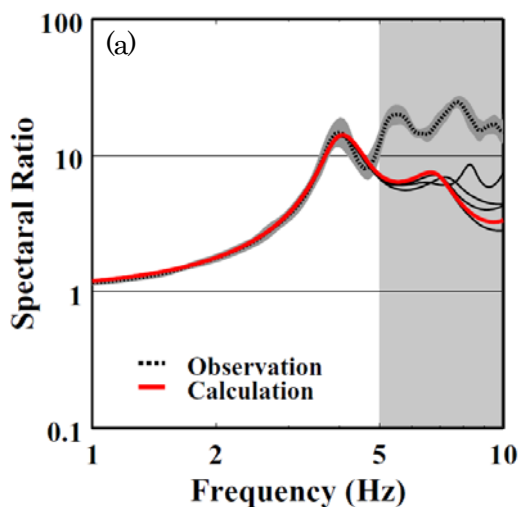


図 6. (a) 振幅スペクトル比の観測値 (黒) と計算値 (点線) の比較. 赤線は, 5 回の試行で最もミスフィット値が小さい場合の計算値を示す. 影で示した部分はフィッティングに用いていない周波数帯域である. (b) 相互相関関数のピーク遅延時間の観測値 (灰色) と計算値 (黒) の比較. 横軸は本震からの経過時間を対数で示してある.