

弾性波アクロスを用いた地殻の速度モニタリングの試み

横山一史¹・土井一生²・川方裕則¹・大久保慎人³・雑賀敦³

¹立命館大学理工学部、²京都大学防災研究所、³東濃地震科学研究所

はじめに

弾性波速度は媒質の弾性定数を反映し、空隙率の変化や流体の移動などのモニタリングに活用できると考えられる。岩石試料を用いた破壊実験においては、最終破壊に先行して弾性波速度が低下することが報告されている (Yukutake, 1989; Yoshimitsu et al., 2009)。このことは、X線 CT スキャンを用いた岩石試料の非破壊観察 (Kawakata et al., 1999) による結果を元に、クラックや断層が形成、成長することによって生じたと解釈されている。

フィールド観測においても、人工地震や相似地震 (Igarashi et al., 2003) を用いることで震源域における本震前後での地震波速度の低下が検出されている (内田ほか, 2002; Justin et al., 2007)。室内実験の結果を踏まえれば、実際の断層においても大地震発生前に震源域近傍における地震波速度低下が検知できる可能性があると期待されるが、その変化は非常に小さいと予想されるため、連続的なモニタリングと地震の準備過程以外で生じる地震波速度変化の把握が必要である。しかしながら、人工地震や相似地震を用いたモニタリングはコストや発生頻度の点から定常的におこなうことが難しい。

こうした問題を克服した地殻内モニタリングをおこなうために、能動震源である弾性波アクロス (ACROSS; Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) が日本国内数箇所で運用されており、アクロス震源近傍の地震波速度の変化が、大地震時 (Ikuta et al., 2004) や周辺環境の変化 (Saiga et al., 2006) に伴って検出されている。そこで、本研究では、地震波速度モニタリングを目指し、弾性波アクロスからの信号が震源距離に応じてどの程度安定に受信されているか、受信信号がどのような時間変化を示すかについて明らかにする。

データ

東濃地震科学研究所 (TRIES) の正馬様地震観測点 (震源距離 1 km)、および、震源距離およそ 10-110 km で南西方向に位置する防災科学技術研究所 Hi-net の 7 観測点において集録された連続波形記録を用いた。データは加速度計 (TRIES)、または、速度計 (Hi-net) で取得された。弾性波は岐阜県土岐市東濃鉦山内に設置された弾性波アクロス送信装置によって、50 秒周期で 10-20 Hz まで周波数スイープされ送信された。サンプリング周波数は 100 Hz、解析期間は 2005 年 10 月 1 日から 2006 年 10 月 31 日の約 1 年間である。

波形スタック

弾性波アクロスからの信号は非常に微弱であるため、観測点における受信信号をスタックすることにより S/N 比を向上することができる。本研究では S/N 比の推定を容易にする

ため、送信されている弾性波のスイープの周期である 50 秒の 4 倍 (200 秒) ごとにスタックをした。さらに、スタックした波形を、加振方向と観測点の向きに応じて回転し、Radial、Transverse 加振に対応する Radial, Transverse 成分の波形を合成した。なお、通常の弾性波アクロスを用いた解析においては、アクロス震源に対する入力信号で観測信号をデコンボリューションすることが一般的であるが、デコンボリューションの不安定さやアクロス震源に対する入力信号と実際の送信信号が異なる場合を考慮し、スタック波形そのものを用いて解析をおこなった。

弾性波アクロスからの信号の受信範囲

図 1 に正馬様における Transverse 加振に対する Transverse 成分の 1 日分 (2005 年 12 月 4 日) のスタック波形、および、スペクトルを示す。50 秒ごとに繰り返す波群が見られ、10-20 Hz で高い S/N 比を持つ信号が確認できた。観測点とスタック期間を変えながら解析をおこなったところ、震央距離 11 km (八百津観測点) では、1 日分のスタックで S/N 比が 2-3 程度、1 ヶ月分で 10 を超える程度となった。また、震央距離 38 km (清洲観測点) では弱いながらもスタック期間を 3 ヶ月とすることで弾性波アクロスからの信号を検出できた。しかし、震央距離が 80 km を越える観測点においては 3 ヶ月分の波形記録をスタックしても弾性波アクロスからの受信信号を確認することは困難であった。

受信された信号の時間変化

弾性波アクロスからの信号がどの程度安定して受信されているかを調べるため、正馬様の 1 日分のスタック波形を用いて、その時間変化を調べた。推定方法は次の 2 通りである。まず、基準日のスタック波形と異なる日のスタック波形との相互相関関数を計算することにより、最大相関係数とその値を取るときの波形の時間ずれを求めた。次に、両波形のクロススペクトルを計算し、S/N 比が十分にある周波数帯域における位相スペクトルから両者の時間ずれを、各周波数における推定値の中間値を取ることにより求めた。各成分が同様の傾向を示したが、最も顕著な変化を示した Transverse 加振時の Radial 成分についての結果を図 2 に示

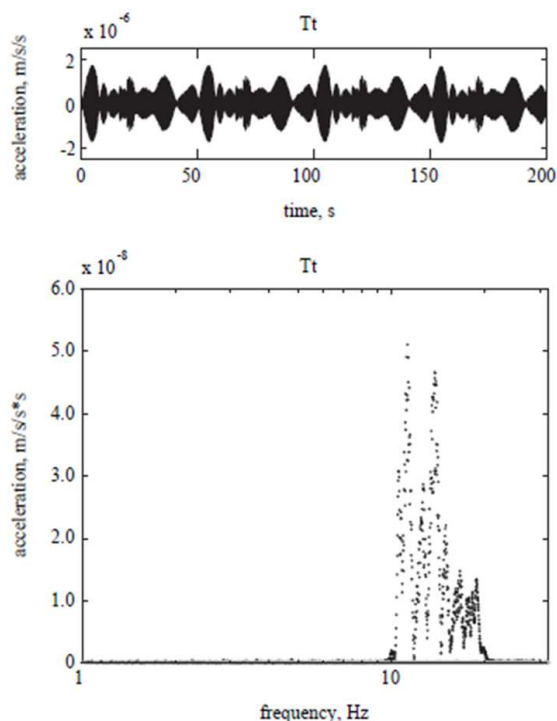


図 1: 正馬様における 1 日分のスタック波形 (2005 年 12 月 4 日) とスペクトル。Transverse 加振に対する Transverse 成分のもの。

す。なお、季節による変化を考慮し、基準日として 2005 年 10 月 2 日、2006 年 4 月 2 日、2006 年 7 月 2 日を選び、3 通り計算をおこなった。

最大相関係数の値は、基準日がどの日であっても 0.8 以上と高い値を示した。1 年を通して安定して弾性波アクロスからの信号が受信されていることがうかがえる。しかしながら、局所的な最大相関係数の低下が期間中に何回か見られる。最寄りの気象観測点多治見における 1 日降水量と比較すると、相関係数の低下と降水量の多い日が対応している傾向が見える (図 2 上図)。一方、相互相関関数から推定したスタック波形の時間ずれはほぼ 0 であり、1 サンプル (0.01 秒) 以上の時間ずれはないものと考えられるが、位相スペクトルから推定した時間ずれは 0.01 秒以内であるが 0 ではなく、かつ、気温が高い季節に差が大きくなる年周変化を示すように見える (図 2 下図)。これらの結果から、降雨によって含水率が高まると散乱などの影響によって波形が変化すること、気温の上昇に伴って地殻内の物質密度が膨張により小さくなり弾性波速度のわずかな低下につながった可能性があることが示唆される。

謝辞：防災科学技術研究所の Hi-net 観測点で集録された連続地震波形記録、気象庁の気象観測データ、および、日本原子力研究開発機構東濃地科学センターの弾性波アクロス震源が発信する弾性波を使用させていただきました。記して感謝いたします。

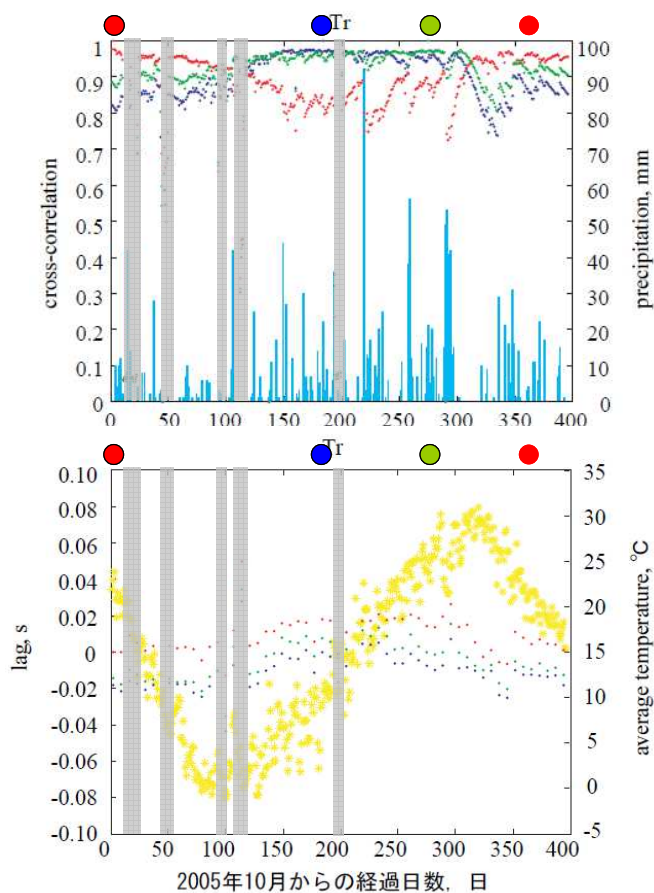


図 2: 正馬様における基準スタック波形との (上図) 最大相関係数と (下図) 位相スペクトルから求めた時間差の時間変化。シンボルの色 (赤、青、緑) はスタック波形の基準日 (それぞれ 2005 年 10 月 2 日、2006 年 4 月 2 日、2006 年 7 月 2 日) を示す。水色の棒グラフ、および、黄色の点は多治見における 1 日の降水量と平均気温をあらわす。