

1. Introduction

観察困難な地中の状態を観察する手段として弾性波、即ち地震波を用いた観測が行われる。地震波速度は地殻内の状態を評価する一つの指標であり、地震波速度差からプレート境界やモホ面などの形状を考察する反射法地震探査やレーザ関数解析、地下の速度構造を推定するトモグラフィ法など、地中の状態を観察するために様々な手法を用いた解析が行われてきた(例えば、弘瀬ら, 2007; 澁谷ら, 2009; 野ら, 2014)。また、岩石実験において、岩石試料内の弾性波速度が岩石試料の強度や含水率、破壊の進展に依存して変化することが報告されていることから(例えば、井上ら, 1970; 林田, 1971; Scott et al., 1993)、弾性波速度の時間変化から媒質内の状態変化をモニタリングできることが伺える。

地震波速度は地殻変動や化石燃料の採取などの人間活動などによる地下の構造変化により時間変化することがある。地震波干渉法は、上記の構造変化による地震波速度変化の検出に適した手法の一つである。しかしながら、特に常時微動を用いた地震波干渉法による地震波速度の推定では、常時微動の震源分布の時間変化に依存して見かけ上の地震波速度変化が検出されてしまうという欠点が存在する。この為、地震波干渉法解析で得られる地震波速度の時間変化から地下構造の変化を推定する際には、構造変化由来の地震波速度変化と見かけ上の地震波速度変化を分けて評価しなければならない。本研究では、スロースリップ(SSE: Slow Slip Event)の検出に利用することを念頭に置いて、地震波干渉法解析における地震波速度変化の抽出と、手法に由来する見かけ上の変化を含む地震波速度の時間変化の要因について、屋内二軸摩擦実験の結果と海底地震観測記録を用いた地震波干渉法解析から考察した。

2. 屋内二軸摩擦実験における弾性波の時間変化

SSE に伴う弾性波の伝播速度や振幅の時間変化を調べるため、断層を模したガウジ層を持つステンレス製ブロックセットを用いて SSE を模した二軸摩擦実験(Slide-Hold-Slide)実験を行い、変位(Slide)と停止(Hold)に伴う反射波と透過波の時間変化を調べた。ガウジ試料には粒径が μm オーダーの粉末として Ca- montmorillonite 粉末と石英粉末を用いてそれぞれ実験を実施した。二軸摩擦実験において反射波と

透過波を同時に観測した研究は稀であり、本研究はその一例である。

反射波と透過波の走時と振幅は変位・停止に伴って時間変化を示した。この時間変化はガウジ粉末の種類に依らず、全ての実験で同様の変化が検出された。具体的には、透過波では変位時に振幅低下と伝搬速度低下、停止中に振幅増加と伝搬速度上昇を検出した。また、反射波では変位時に振幅増加、停止時に振幅減少を検出した。

変位・停止の切り替わり時の摩擦係数の急激な変化に伴う反射波と透過波の時間変化を調べるため、より頻繁、かつ、同時に反射波と透過波の観測を行えるように約 1 秒毎に収録を行うプログラムを作成し自動収録を試みた。その結果、ガウジ試料の種類により、変位から停止に切り替わる時の透過波走時の時間変化が異なることがわかった。一方、自動収録化に伴い使用するオシロスコープを変更したことにより、オシロスコープの性能差から反射波の時間変化を検出できなくなるという欠陥があった。この欠陥をプログラムと観測環境の両面から解決することが今後の課題である。

透過波の時間変化から求めたガウジ層内の伝播速度の時間変化はガウジ層内の密度の時間変化と相関が見られた。この伝播速度の時間変化は、先行研究(例えば、Birch, 1961; Kaproth and Marone, 2014)と一致しており、実際の SSE に伴う地下構造の変化を反映した地震波速度変化として期待される変化である。一方、ガウジ層内をほとんど伝播しない反射波から速度変化を求めることは困難であった。また、透過波から求めた伝播速度と反射波の走時の時間変化から、反射面の位置の時間変化が示唆された。この位置の時間変化はガウジ層内の密度変化に依存している可能性がある。

媒質内の密度の変化は弾性波の振幅にも反映された。本研究で解析した反射波と透過波では、媒質内の伝搬速度と密度の積である音響インピーダンスの時間変化を反映した振幅の変化が得られた。この結果は、入力波の周波数や振幅を任意に変化できる人工震源を用いて、断層で反射する反射波や断層を透過する透過波を観測できるように適当な震源と観測点を設置した観測を行えば、自然の地震や SSE における断層周りの密度の時間変化に依存した反射波と透過波の振幅の時間変化が検出される可能性を示唆している。

3. 海底地震観測記録を用いた地震波干渉法解析で抽出される地震波速度変化とその要因

2 章で得られた結果が自然界でも同様に検出できるか検証するため、観測期間内に大地震、SSE、及び、

SSEに伴い発生した低周波微動が確認されている5年間(2008~2012年)に宮城県沖に設置されていた海底地震計(OBS: Ocean Bottom Seismograph)の常時微動記録を用いて地震波干渉法による地震波速度変化の抽出を試みた。なお、本研究は5年間にわたる長期間のOBSの自己相関関数の時間変化を観測した初めての研究である。

地震波速度変化の抽出には以下の方法で作成した15日間の自己相関関数のアンサンブル平均(15-day ACF)を使用した。まず、機器特性を補正したOBSの観測記録から微小地震や機械的・生物学的ノイズなどの異常値の影響を除去するため、0.25-2.0Hzのバンドパスフィルタの適用と1bit化処理を行った。次に、移動窓を5秒として0.1秒刻みの120秒間(0.0-120.0秒)の自己相関関数を求めた。最後に、予めピックアップしておいた自然地震の地震波形が含まれる時刻の自己相関関数は除外して、前後7日を含む15日間の自己相関関数のアンサンブル平均を求めた。

15-day ACFには、振幅や1Hz以上の周波数帯域のパワースペクトル密度関数などの観点から冬期と夏期に二分される年周変化が見られた。この年周変化には観測点周りに吹く風との関連が見られた。また、風と常時微動にも関連が見られたことから、15-day ACFの年周変化は風により励起される常時微動の時間変化により引き起こされるものである可能性が高い。

15-day ACFの中で比較的年周変化が見られない位相に着目して地震波速度の時間変化を評価すると、海溝側の観測点のほとんどで2011年東北地方太平洋沖地震に伴う2%未満の地震波速度低下とその回復過程が検出された。一方、15-day ACFの年周変化の影響を受ける位相に着目すると、15-day ACFの年周変化に依存した位相遅れ・進みが大半の観測点で同様に検出された。このような特徴の中で、2011年東北地方太平洋沖地震前のSSEに関して、海溝側の観測点で、陸側の観測点と同じパターンが見られないという現象があった。海溝側の観測点にSSEに伴う地下構造の変化の影響が現れている可能性がある。また、SSEと低周波微動の発生時に位相遅れを伴わない15-day ACFの時間変化も検出された。

4. 実験結果と観測結果の比較

二軸摩擦実験にて観測された疑似SSEに伴う弾性波の時間変化(2章)と、宮城県沖で観測されたSSEに伴う地震波速度の時間変化(3章)、及び、メキシコのグレーロ州で報告されたSSEに伴う地殻内の地震波速度の時間変化(Rivet et al.,2011; 2014)を比較すると(表1)、3点の相違点が見られた。

二軸摩擦実験では反射波による SSE に伴う速度変化の検出は困難であったが、観測された OBS 記録の自己相関解析では SSE に伴う速度変化が示唆された。これは実験環境と自然界(沈み込み帯)とで反射波の主たる伝播経路中の媒質が異なった故に生じた可能性が高い。実験に用いた試料セットは変位・停止に伴い伝播速度がほとんど変化しないステンレス層と伝播速度が変化するガウジ層の二種類の層から構成されており、反射波の初動は実験中に伝播速度が変化しないステンレス層のみを伝播したため疑似 SSE に伴う伝播速度の変化は期待できない。一方、沈み込み帯のプレート上盤では堆積に伴う構造や上盤内部の断層や亀裂により反射面がプレート境界以外にも存在しており、Rivet et al., (2011)が指摘したように、SSE に伴い観測された地震波速度変化は、歪みそのものよりも歪み速度に関係した上盤側内部の断層周辺の非線形弾性応答より生じたのかもしれない。

二軸摩擦実験では疑似 SSE に伴って速度低下のみが検出されたが、メキシコ・ゲレーロ州の SSE では SSE 中にまず地震波速度低下が起き、その後 SSE 発生前の地震波速度まで速度が回復したと報告されている。これは SSE が停止する過程の違いを反映している可能性が高い。沈み込み帯で発生する SSE はプレートの沈み込みに伴い蓄積される応力を解放するために自発的に開始・停止するのに対し、実験室の疑似 SSE では SSE 活動に見立てた変位を人為的に開始・停止させている。沈み込み帯では SSE が徐々に停止するのに比べて、疑似 SSE では強制的に滑りを停止させている(Ito et al., 2013; Wallace et al., 2016)。実験では SSE を急激に停止させたため速度回復を観測できなかった可能性が高く、変位を継続していれば自然の SSE と同様に速度回復過程を検出できたかもしれない。

実験やメキシコ・ゲレーロ州の SSE では SSE の発生と同時に速度変化が検出されたのに対し、宮城県沖の SSE では SSE 発生前から速度変化が検出された。これは SSE 後に SSE 発生領域の近傍で大地震が発生したか否かによる違いである可能性がある。宮城県沖の SSE は 2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0)の準備過程として発生したとの解釈もなされており(Kato et al., 2012)、大地震の震源域周辺の応力集中の影響を受け、疑似 SSE やゲレーロ州の SSE とは異なるタイミングで速度変化した可能性がある。また、宮城県沖の SSE の発生時期の推定に使用した海底圧力計記録の SSE の検知能力を考慮すると、SSE の開始時期が海底圧力計から推定されたものよりも早い可能性も完全には否定できず、本研究で検出された速度低下の時期から SSE が観測点下で発生していた可能性もある。

5. まとめ

常時微動を用いた地震波干渉法により抽出される地震波速度の時間変化は、地中の速度構造変化による変化と常時微動の時間変化による見かけ上の変化を同等に評価してしまう。本研究では、まず、SSEに伴う速度構造の変化を調べるため、屋内摩擦実験において SSE の再現実験を行い、SSEに伴う弾性波の速度変化を反射波と透過波の両方から検出できるか検証した。次に、実際に SSE が発生した期間に設置されていた OBS の常時微動記録に地震波干渉法を適用し、自己相関関数の時間変化から推定した地震波速度の時間変化の要因を構造変化由来の変化と見かけ上の変化に分けて考察した。

実験では、反射波と透過波の両方で断層に見立てたガウジ層内の密度の時間変化に依存した振幅と走時の時間変化を検出した。また、海底観測記録を用いた地震波干渉法解析から 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う構造変化由来の地震波速度変化、及び、SSEに伴う構造変化由来の位相遅れ、年周期的な変化を持つ見かけ上の位相変化が示された。これらの結果は、透過波だけではなく、反射波、及び、自己相関関数を用いた SSE に伴う構造変化の検出可能性を示唆している。

表 1. 実験で再現した疑似 SSE に伴う弾性波速度変化と OBS 記録を用いて推定した SSE に伴う地震波速度変化の比較

	検出に用いた波の種類	SSE に伴う速度変化
疑似 SSE	実体波(反射波)	有意な速度変化は検出できなかった
疑似 SSE	実体波(透過波)	速度低下(一部、変位フェイズ後半で速度回復)
2011 年宮城県沖 SSE 年周変化の影響を受ける位相	実体波(反射波)or 表面波 (自己相関関数)	SSE 前に速度低下、SSE 初期に速度回復
2011 年宮城県沖 SSE 年周変化の影響を受けにくい位相	実体波(反射波)or 表面波 (自己相関関数)	速度変化しない
2006 年グレーロ SSE (Rivet et al., 2011)	表面波 (相互相関関数)	SSE 初期に速度低下、SSE 中期～後期に速度回復
2010 年グレーロ SSE (Rivet et al., 2014)	表面波 (相互相関関数)	SSE 前期に速度低下、SSE 後期に速度回復