

繰り返し発破と雑微動の併用による地震波速度の時間変化の検出 - 桜島への適用 -

廣瀬 郁・中原 恒・西村 太志 (東北大・理・地球物理)

はじめに

近年、コーダ波干渉法や地震波干渉法により大地震や火山活動に伴う地震波速度の時間変化が検出されている。ほとんどの場合はどちらか一方の手法のみが用いられているが、それぞれメリットとデメリットがある。コーダ波干渉法では繰り返し発破などの相似性の高い地震記録を用いることで精度は保証されるが、一般的に繰り返し間隔が長い。一方の地震波干渉法は連続記録を用いる場合は時間分解能が高いが、ノイズ源の季節変動などの影響を受ける。このような各手法の特徴をふまえ、両者を相補的に用いることで、安定的に高時間分解能で地震波速度変化をモニタリングすることが可能となると考えられる。2つの手法を同時期のデータに適用した例としてはBudi-Santoso and Lesage [2016]によるメラピ山での解析があるが、コーダ波干渉法の震源として深さ0.5km-2.3kmで発生した火山性地震を用いており、同じような領域を通過した地震波を解析した結果を比較したものではない。そのため、2つの手法の結果の比較検証という点ではまだ不十分である。そこで本研究では、桜島において、震源が地表付近にある繰り返し発破の記録にコーダ波干渉法を適用し、また雑微動記録に地震波干渉法を適用することで、両者の結果を直接比較検証した。

データと解析手法

桜島の島内に設置されている6台の気象庁短周期地震計で捉えられた繰り返し発破と雑微動の上下動成分の記録を解析する。繰り返し発破の実施間隔は1年で、薬量20kgの発破が13点で行なわれている(2013年は5点のみでうち1点の薬量が200kg)。地震計と発破点の配置を図1に示す。コーダ波干渉法解析で用いるのは2011年から2014年の繰り返し発破記録であり、解析する周波数帯は2-4Hz, 4-8Hz, 8-16Hzである。ここでは相関係数とS/N比の基準を満たす記録のみを用いて地震波速度変化率を推定する。一方、地震波干渉法解析で用いる雑微動記録は2012年から2014年の3年間の連続記録であり、周波数帯は1-2Hz, 2-4Hz, 4-8Hzである。ここでは15の観測点ペアで、1日ごとに相互相関関数(CCF)を計算し、2012年と2013年の2年分スタックしたCCFをリファレンスとして地震波速度変化率を推定する。

地震波速度変化率の推定にはMoving Window Cross-Spectral法 [Poupinet et al. 1984] を用いる。図2は、KOMEでの2011年と2012年の発破に対する観測点V.SFT2での速度波形記録とコヒーレンス、そして地震波速度変化率の推定結果である。この波形の場合、ラプスタイム0-20sでの相関係数は約0.93である。速度変化率の推定の際の直線のフィッティングはラプスタイム0-10sで行い、この例では2011年から2012年の間で0.07%程度の速度増加となっている。また、地震波干渉法解析における地震波速度変化率の推定ではCCFのラグタイム ± 10 sで直線フィッティングを行う。

各解析の結果と両者の比較

まず、コーダ波干渉法解析により1年ごとに地震波速度変化率を推定した。主にS/N比の問題から、地震波速度変化率が推定できたのは発破点に近い島の北東側の経路が大半であった。地震波速度変化率の大きさには周波数依存性が見られ、最大値は2-4Hzで $0.47 \pm 0.06\%$ 、4-8Hzで $0.24 \pm 0.03\%$ 、8-16Hzで $0.15 \pm 0.03\%$ となり、誤差は0.01-0.03%程度であった。次に、コーダ波干渉法との比較のために地震波干渉法解析を行った。地震波干渉法解析では1日ごとに地震波速度変化率を推定し、発破が行われていない期間での地震波速度の時間変化についても調べた。解析の結果、1日ごと、観測点ペアごとのばらつきはあるものの全周波数帯で年周的な変動が確認された。変動の振幅には周波数依存性が見られ、1-2Hzで最大2%、2-4Hzでは1%、4-8Hzでは0.5%であった。

両者の結果の比較では、コーダ波干渉法、地震波干渉法ともに全ペアの平均を取った上で比較を行う。これには地震波干渉法の結果の観測点ペアごとのばらつきを抑えることに加え、ノイズ源の季節変動の影響を軽減する [例えば, Froment et al. 2010] という目的がある。まず、2012年を基準にしてコーダ波干渉法で地震波速度変化率を計算し、発破日の地震波干渉法の結果と比較したところ、コーダ波干渉法の結果は地震波干渉法でのペアごとのばらつきの範囲内に収まっており、両者の結果は調和的であった。次にコーダ波

干渉法で年の組み合わせを変えてみても、結果は大きく変わらなかった。このことは、コーダ波干渉法により安定的に地震波速度変化率を推定できていることを示している。

地震波速度変化と地殻変動との関係

地震波干渉法により検出された年周期的な地震波速度の時間変化の要因を解釈するために、桜島島内に設置されている国土地理院のGNSS観測点(図1)の座標値から面積歪を計算し両者の比較を行った。その結果、特に1-2Hzで両者の間に顕著な相関関係が認められた。また、地震波速度変化率と面積歪の値から地震波速度変化の歪感度を見積もったところ、Nishimura et al. [2005]による岩手山での解析結果と調和的な値となった。このことは、地震波速度の時間変化と歪変化が対応していることを示している。

まとめ

本研究では震源が地表付近にある繰り返し発破の記録にコーダ波干渉法を、また同時期の雑微動記録に地震波干渉法を適用することで、類似した波動場に対して2つの異なる手法の結果を比較検証した。比較の結果、両者は調和的であった。また、地震波干渉法により検出された年周期的な地震波速度の時間変化が歪変化に対応していることが分かった。以上のことから、両者を相補的に用いることで、安定的かつ高時間分解能で地震波速度変化をモニタリングすることが可能となると考えられる。

謝辞

本研究では、桜島に設置されている気象庁の短周期地震計のデータ、京都大学防災研究所など全国の9大学と気象庁が協力して行われた桜島の人工地震探査のデータ、国土地理院のGNSS観測点の座標値を使用させて頂きました。また、一部の図表の作成には国土地理院の基盤地図情報10mメッシュ(標高)を使用させて頂きました。記して感謝いたします。

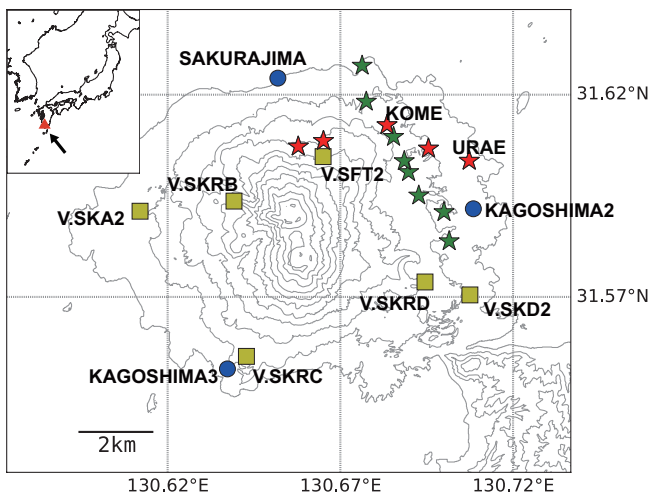


図1. 桜島島内に設置されている気象庁の短周期地震計(四角)と発破点(星)の配置。赤色の星は2013年の5点の発破点を表す。また、3つの青丸は国土地理院のGNSS観測点である。

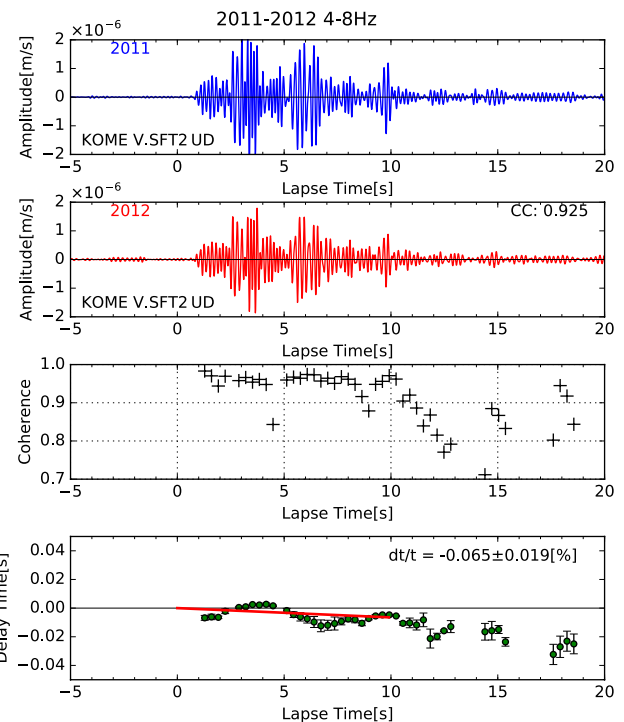


図2. 発破点KOMEの観測点V.SFT2での4-8Hzの速度波形記録(青:2011年, 赤:2012年)とラプスタイムごとのコヒーレンス。最下段はMoving Window Cross-Spectral法により推定したラプスタイムごとの波形間の時間遅れ(緑色の丸)と直線フィッティング(赤の直線)の結果。