

微動と連続震源装置を用いた地殻内部の弾性波速度モニタリング
Monitoring seismic velocity changes based on ambient noise and continuous seismic source

○辻 健
○Takeshi TSUJI

Monitoring of earthquake faults and volcanoes contributes to our understanding of their dynamic mechanisms and to our ability to predict future earthquakes and volcanic activity. We first report spatial and temporal variations of seismic velocity of the whole Japanese Island based on ambient seismic noise. The velocity variation could indicate temporal variation of pore pressure. However, when we applied the ambient noise monitoring to the small-scale targets, we found that the temporal variation of ambient noise characteristics decreases the monitoring accuracy. To solve the instability of monitoring for localized targets, we have developed a permanent seismic monitoring system using a continuous seismic source. We deployed the small-size monitoring source system in the Kuju geothermal field in the northeast Kyushu Island, Japan. Although our monitoring source system is small and generates high frequency vibrations, the signal propagated >80 km distance using two-month continuous source data. Our field experiments demonstrate that variation of seismic velocity of the crust could be identified with high accuracy (~0.01 %). Furthermore, we used the DAS system for monitoring data acquisition, and succeeded to identify the temporal variation of seismic velocity.

1. 微動を用いた日本列島モニタリング

地震や火山活動に関係する地殻内部の時空間変化を調べるため、微動を用いたモニタリングシステムの構築を試みている。微動に対して地震波干渉法を適用することで、仮想的な人工地震探査データを構築することができる。その仮想的な地震探査データから、弾性波速度の時空間変化を調べるというアプローチである。この手法を、日本全国に展開されている地震計 (Hi-net) に適用した結果、地殻内部の速度変化を推定することが可能となってきた (図 1 ; Nimiya et al., 2017 Sci. Adv.)。

モニタリングで得られた速度変化と、降水に伴う間隙水圧変化を調べたところ、モニタリングで得られる速度変化は間隙水圧の変化と関係があることがわかってきた (Andajani et al., 2020 EPS)。実際、地震や火山噴火前には、弾性波速度が低下することも間隙水圧の上昇で説明することができる。現在、九州地域のモニタリング結果 (弾性波速度変化) を自動的に計算するシステムを構築し、その結果を Web サイトから公開している (Hutapea et al., 2020 EPS)。

また陸上だけでなく、海底地震計を利用した場合でも、同様に弾性波速度の変化をモニタリングができる (図 2; Ikeda and Tsuji, 2018 PEPS)。南海

トラフに設置されている DONET を使って解析したところ、地震が発生していない時期は S 波速度が、徐々に上昇していることも明らかとなった。この原因には、プレートの沈み込みに伴う応力状態の変化が考えられる。

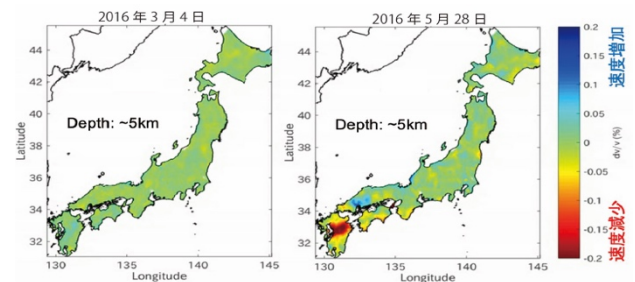


図 1. 日本列島の弾性波速度モニタリングの結果。

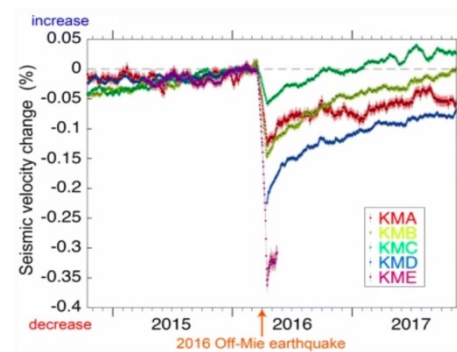


図 2. DONET を使ったモニタリング結果 (Ikeda and Tsuji, 2018 PEPS)

2. 連続モニタリング震源装置を用いたモニタリング

微動を用いた地殻深部のモニタリングでは、時間方向に安定した低周波数の微動を利用している。しかし、浅部のモニタリングには高周波数の微動を用いる必要があり、その高周波数の微動は時間方向に不安定であることが多い (Tsuji et al., 2016 Interp.)。そこで我々は、貯留層を高い精度で連続的にモニタリングするため、微小な振動を連続的に発振する「定常震源装置」と、その解析手法の開発を行っている。さらに、その信号を多点で受振するために、光ファイバー型地震計 DAS の導入を進めている。

定常震源装置は、偏心した錘を回転させることによって生じる遠心力を利用し、信号を発生させる。この装置では、錘の回転周波数や位相を精密に制御している。そのため、発振する信号の振動エネルギーが微弱であっても、長期間観測されたデータを重合することで SN 比を向上させることができる。実際、2ヶ月間の定常震源装置からの信号を重合した結果、約 80 km 離れた地震計まで信号が届いていることが明らかになった (図 3)。

定常震源装置から約 14 km の距離にある Hi-net 地震計で記録されたモニタリング信号の時間変化を調べたところ、P 波速度の変化を、0.01% 程度の精度で捉えることができた。

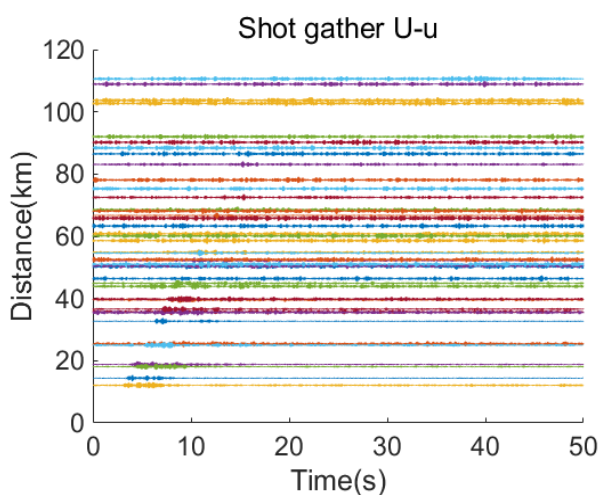


図 3. 定常震源装置からの信号. 80km まで信号が伝播していることが分かる.

3. DAS の利用

モニタリング結果の空間解像度を向上させるには、震源の信号を受信する地震計を、できる限り

多く設置する必要がある。そこで我々は、光ファイバーケーブルを利用して、長大・高密度地震計ネットワークを構築した。連続モニタリング震源装置から 1.7 km 離れた九州大学の施設に光ファイバーケーブルを設置した。ファイバーケーブル自体を地震計 (ひずみ計) として利用する手法は、Distributed Acoustic Sensing (DAS) と呼ばれ、近年、石油ガス開発といった資源開発で利用されつつある。

解析の結果、モニタリング震源装置からの信号を記録することが可能となった (図 4)。光ファイバーケーブルは水平に設置されているので、水平方向の振動 (S 波) を観測していることになる。1 日間の定常震源装置の信号を利用した場合でも、震源装置からの信号が到達していることを確認できた。

また光ファイバーケーブルで取得した 1 日ごとのモニタリング信号の時間変化を解析することで、S 波速度変化のモニタリングを行なった。その結果、測定期間中に S 波速度が徐々に増加していく傾向と、0.3% 程度の突発的な S 波速度低下を検出するなど、高い精度でモニタリングすることができた。

現在は、海底に設置された光ファイバーケーブルと、定常震源を用いたモニタリングを実施している。

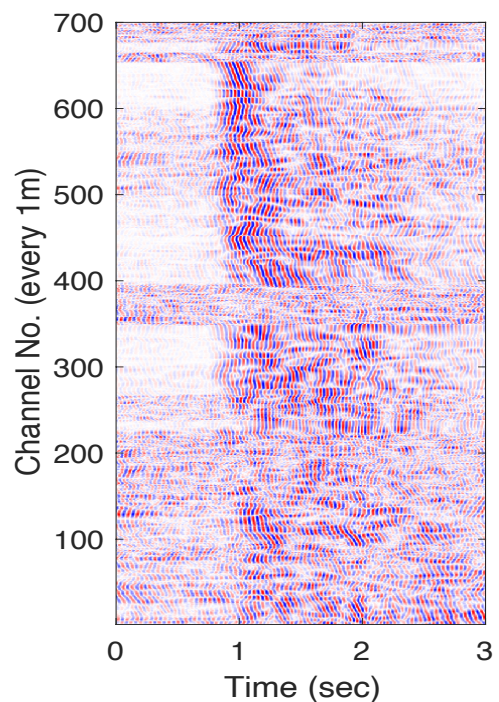


図 4. DAS を利用して定常震源装置からのシグナルを記録した例.