

## 別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目： 精密制御定常震源装置を用いた地震波伝播速度変化・減衰  
 変化の高精度モニタリングに関する研究  
 (On the precise monitoring of seismic velocity and attenuation  
 with highly-stable artificial seismic sources)

氏 名： 辻 修平

## 論 文 内 容 の 要 旨

地震波伝播速度の変化や減衰の変化は、地下構造の変化を捉えるために研究されてきた。伝播速度の変化や減衰の変化をもたらす代表的なメカニズムには、地下の岩石に存在する微小な亀裂(クラック)の開閉や、クラック中の流体の流動、岩石の破壊や治癒が挙げられる(Birch 1960; Simmons 1964; White 1966; Nur and Simmons 1969; Winkler and Nur 1982; Adam et al. 2013)。そのため、フィールドで行われる研究では、地下の応力変化や流体の移動、岩盤の破壊をとらえるために地震波伝播速度の変化や減衰の変化を時間的に連続に計測する、モニタリングが試みられてきた。モニタリングは、高精度の計測が行える人工震源を用いた能動的手法(Karageorgi et al. 1992; Ikuta et al. 2002; Yamamura et al. 2003)と、広い領域を簡単に調査できる自然地震を用いた受動的手法(Sawazaki et al. 2009; Nakata and Snieder 2011; Clarke et al. 2013; Ikeda and Tsuji 2018)の両方で研究が行われてきた。特に 2000 年頃からは、観測技術の向上と受動的な手法の飛躍的な発展(Chun et al. 2004; Snieder 2004; Sens-Schönfelder and Wegler 2006)が後押し、世界各地で地震時の強振動に伴う変化や火山活動に伴う変化が報告されるようになった。

本研究では、震源に精密制御定常震源装置「アクロス」(熊澤・武井 1994; Kumazawa et al., 2007)を用いることで、より詳細に地震波伝播速度変化・減衰変化を計測することで、地下で起きている現象の理解を深めることを目指した。アクロスは、周波数と位相を精密に制御しつつ偏心錘を回転させることにより、連続的に設計通りの地震波を励起する。発信する地震波の設計には工夫がこなされており、アクロスの信号と背景雑音が周波数領域で区別できるようになっている。これらの特徴により、アクロスを震源として用いることで、安定した計測を連続的に行うことができ、さらにその計測の誤差を正確に推定することもできる。

地震波伝播速度変化や減衰変化の高精度化のために本研究で行ったことは、信号雑音比 (S/N) の小さな信号に対しても安定して適用できる走時変化のフィッティング手法の開発と、ノイズ振幅の変化によるバイアスを受けない振幅変化解析手法の開発の 2 点である。前者では、走時変化のモデル化を複素領域で行い、複素平面上で最小二乗法を解くことによって、走時変化を記述したモデルのパラメータを推定する手法を開発した。一般的に、走時変化をモデルフィッティングする際には、観測された伝達関数と基準とする伝達関数の位相差を走時差に直して推定に用いるが、この手法では、観測された伝達関数を直接フィッティングする。これにより、位相差を計算する非線形なプロセスが不要になるため、S/N の小さなデータでも安定して扱えるようになり、より遠くの観測点の、あるいは、より時間分解能の高いデータを推定に用いることができるようになった。後者では、アクロスの信号特性を活用してノイズのエネルギーを推定し、観測されたエネルギーからそれを引くことで、信号自体のエネルギーを推定し、その変化から減衰変化を計測する手法を開発した。これまで振幅変化の推定に利用されていたエンベロープ振幅の比較では、ノイズ振幅の変化は、見かけ上の振幅の増減を引き起こしてしまうが、この手法では、ノイズ振幅の変化は、推定値の分散を変化させるだけで期待値に影響を与えない。そのため、ノイズ振幅の変化があっても安定して減衰変化を求めることができるようになった。

走時変化のフィッティング手法は東海地方において震源から 35km 以内の観測点で、2007 年 3 月から 2017 年 10 月までの約 10 年間にわたり、観測された日々の伝達関数の解析を可能とし、解析期間を通して継続する走時の経年的な早まりを検出した。この研究では、静岡県中部の森町に設置されているアクロスを用いて地震波を励起し、その周辺 35km 以内に位置する、防災科学技術研究所の高感度地震観測網 Hi-net 観測点 13 点で受信した。各観測点で受信波形から伝達関数を計算し、位相差から走時変化を計算して、地震波伝播速度の変化を推定した。長期間にわたる解析期間中には、震源や観測点の故障に見舞われることもあったため、アクロスの運転状態と観測点の観測状況を解析し、利用可能な伝達関数を精査するアルゴリズムを開発し、また、観測システムの時計の誤差に伴う人為的な走時変化も國友 (2014) の手法と独自開発した手法を組み合わせで補正し、高精度な走時変化を計測した。得られた走時変化に、先述の走時変化のモデルフィッティング手法を適用することで、解析した 13 観測点のほとんどすべての観測点で、解析期間を通して継続する走時の経年的な早まりと、期間内に発生した東北地方太平洋沖地震に伴うステップ状の走時の遅れが検出された。これらの走時変化の原因を調べるために、距離依存性と方位異方性の解析し、経年的な早ま

りは続成作用による岩石の強度獲得が、地震時の遅れは、地震時の強振動に伴う岩石の破壊がそれぞれ原因と推測した。

減衰変化推定手法は、兵庫県淡路島で行われた実験のデータに適用し、地震時の強振動に伴う減衰の増加とその異方性を検出することに成功した。淡路島の実験データは、Ikuta et al., (2002)で取得されたもので、彼らの研究では、地震時の強振動に伴う伝播速度変化とその異方性が報告されていた(Ikuta and Yamaoka 2004)。本研究は、同じデータセットに開発した減衰変化推定手法を適用し、地震に伴う減衰の増加を検出した。この地震時の変化は最大で5%程度の振幅の減少として推定され、比較のために、他の減衰変化推定手法で用いられている $\Delta Q^{-1}$ に換算すると、 $10^{-3}$ のオーダーであった。この変化量は、先行研究(Kelly et al. 2013; Wang and Ma 2015)で報告されている地震に伴う減衰変化の推定値とオーダーで等しかった。さらに、地震時の減衰変化の異方性についても議論を行った。まず、異方性がある媒質を簡単なモデルで表現して、地震時の走時変化と振幅変化の方位依存性の分布を検討した。その結果、減衰変化の異方性推定は、走時変化を用いて異方性の主軸を推定し、その方向の振幅変化を比較することで調べられることが分かった。そこで、走時変化の異方性の主軸の方向を独自に再解析したうえで、二つの主軸方向の振幅変化の大きさを比較し、地震時の振幅変化にも異方性があることを発見した。異方性の傾向は、走時がより遅れる方向で、より大きな減衰が観測されるというもので、この結果は、クラックが含まれる媒質を用いて行われた岩石実験の結果(例えば、Tillotson et al., 2014)と調和的であった。

最後に、ここまでの研究の到達点を確認し、将来の研究に必要な課題を明らかにするために、岐阜県土岐市に設置されたアクロスを用いて、地震波速度変化・減衰変化を12年間にわたって推定した。近距離(約10km)、中距離(約20km)、遠距離(約60km)にあるHi-net観測点3点で2007年から2018年までの12年間の伝達関数を計算して、その走時変化・振幅変化を推定した。その結果、先行研究によって、土岐アクロスのごく近傍の観測点で発見されていた震源近傍の地下坑道の冠水に伴う走時変化(國友・他, 2017)を、近・中距離の観測点でも観測することに成功し、近距離の観測点では、それに伴う振幅変化を検出することにも成功した。一方、各観測点では先に挙げた以外にも様々な変化が捉えられていたが、その原因や特徴は現段階では解明できていない。今後、走時変化・振幅変化の異常検知の手法や、振幅変化へのモデルフィッティング手法、さらにノイズに強い走時変化・振幅変化の検出手法といった解析手法の開発を行うことで、さらに多様な地下構造変化に伴う速度・減衰の変化が検出できるようになると考える。