

並進及び回転の6成分微動波形を用いた地盤構造同定  
 Study on the Application of Translational and Rotational Microtremor to Subsurface Structure  
 Estimation

○周宇廷・長嶋史明・松島信一

○Yuting CHOU, Fumiaki NAGASHIMA, Shinichi MATSUSHIMA

In order to accurately evaluate the seismic waveform caused by an earthquake, high-resolution subsurface velocity structure is indispensable. Subsurface velocity structure could be obtained through several methods, such as seismic survey, borehole logging, and microtremor array method. Due to the difficulties (e.g., noise problems, budget constraints, etc.) of implementation for some of the methods, microtremor array method has become the most popular technique nowadays. Nevertheless, since microtremor array requires deploying sensors at certain distances on the surface, numerous places such as urban areas, volcanos, and hillsides are unsuitable for this method. In this study, we focus on an innovative method to estimate surface wave phase velocity dispersion curve based on translational and rotational waveforms (6 degree-of-freedom, 6 DOF), and estimate subsurface structure utilizing the estimated dispersion curve. This method only requires the 6 DOF waveforms at the target site, which overcomes the restrictions of other methods.

### 1. はじめに

地震波は震源から地表まで伝播する間に様々な要素から影響を受ける。それらの要素の中でも地盤構造は地震波の振幅や継続時間を大きく左右する要素の一つである。そのため、精度良く強震動を評価するためには、詳細な地盤構造が必要不可欠である。

地震工学において、浅部・深部地盤構造の調査にはボーリングや表面波探査法がよく使われている。これらの手法はそれぞれメリットとデメリットを持つ。ボーリングは地盤の構成を直接計測するためある種絶対的な情報として扱い得るが、実施コストが高く複数点や地盤深部までの調査には不向きであり、ごく限られた点の情報であり周囲の地盤も同様である保証はない。一方、表面波探査法は地表でいつでも観測できる常時微動を使用するため、複数点で観測した領域の平均的な地盤速度構造を得ることができる。また、コストはボーリングより低い。しかし、表面波探査法は地表面に観測点を展開する必要がある。そのため、実務上狭い道路や傾斜面、土地所有権を得難い場所には不向きである。

近年、高精度な回転地震計が新しく開発され<sup>1)</sup>、常時微動レベルの振動の回転成分を観測することが可能となった。そこで、常時微動の並進及び回

転の合計6成分を用いて、地盤構造を同定する可能性が新たに提案されている<sup>2)</sup>。本研究は、理論的な並進及び回転の6成分波形を用いて、地盤の位相速度分散曲線を求め、地盤構造を同定する方法について検討している。

### 2. 解析手法

Igel et al. (2005)<sup>3)</sup>が示したように、横偏平面波(transversely polarized plane wave)を仮定した場合、鉛直軸周りの回転率(rotation rate) $\Omega_z$ と transverse 方向の加速度 $a_T$ は(1)式の関係を持つ：

$$C_L(f) = -\frac{a_T(f)}{2\Omega_z(f)} \quad (1)$$

ここで $C_L$ はラブ波の位相速度、 $f$ は周波数である。すなわち、同じ地点で並進及び回転の6成分を観測することによって、(1)式からラブ波の位相速度を求めることができる。しかし、(1)式の関係性を常時微動に応用する場合、様々な方向から波が到来するため、transverse 方向もしくは震源の方向を求めなければならない。そこで、連続波形を sliding window で切り取り、水平軸の加速度波形を方位 $0^\circ$ から $360^\circ$ まで回転し、各角度の加速度波形と回転率 $\Omega_z$ との cross-correlation を計算し、cross-correlation coefficient が閾値以上で最大値となる方位を震源の方向とした。Time window ごとに異なる

る方位の transverse 成分の加速度 $a_T$ と鉛直軸周りの回転率 $\Omega_Z$ から(1)式を用いてラブ波の位相速度を求める。

### 3. 解析及び解析データ

本研究では解析手法を実観測データに適用する前に、まず数値解析で解析手法の妥当性を検証する。数値解析では、地盤構造モデル(図1)の地表面にランダムに点震源を配置しグリーン関数を求め、その random noise wavefield を合成し、並進及び回転成分を計算した<sup>4),5)</sup>。計算した6成分の波形を使い、上述の解析手法を用いてラブ波の位相速度曲線を求めた(図2)。合成した6成分波形で計算した位相速度曲線(図2 中青線)は1.2 Hz以上の周波数域で概ね理論値(図2 中黒線)と一致しているが、3 Hz以上の周波数域では位相速度を過大評価されている。図1の medium response からラブ波の高次モードは約3.4 Hzから基本モードより卓越することが分かる。そのため、図2での過大評価は高次モードを反映している可能性が考えられる。このほか、比較のために従来の常時微動アレイの手法(ここではF-K法<sup>6)</sup>)も用いて解析を行う。

### 参考文献

- 1) Bernauer, F., Wassermann, J., Guattari, F., Frenois, A., Bigueur, A., Gaillot, A., E., de, Toldi, D., Ponceau, U., Schreiber & Igel, H. (2018). BlueSeis3A: Full characterization of a 3C broadband rotational seismometer. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 620-629.
- 2) Wassermann, J., Wietek, A., Hadziioannou, C., & Igel, H. (2016). Toward a single-station approach for microzonation: Using vertical rotation rate to estimate Love-wave dispersion curves and direction finding. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(3), 1316-1330.
- 3) Igel, H., Schreiber, U., Flaws, A., Schuberth, B., Velikoseltsev, A., & Cochard, A. (2005). Rotational motions induced by the M8.1 Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003. *Geophysical research letters*, 32(8).
- 4) Hisada, Y. (1994). An efficient method for

computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(5), 1456-1472.

- 5) Sollberger, D., Greenhalgh, S. A., Schmelzbach, C., Van Renterghem, C., & Robertsson, J. O. (2018). 6-C polarization analysis using point measurements of translational and rotational ground-motion: theory and applications. *Geophysical Journal International*, 213(1), 77-97.
- 6) Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57(8), 1408-1418.

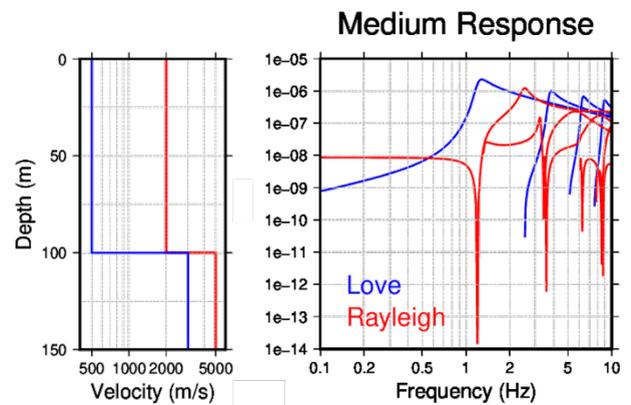


図1 Random noise wavefield に用いる速度構造(赤: P波速度、青: S波速度)と速度構造に基づいた表面波の medium response。

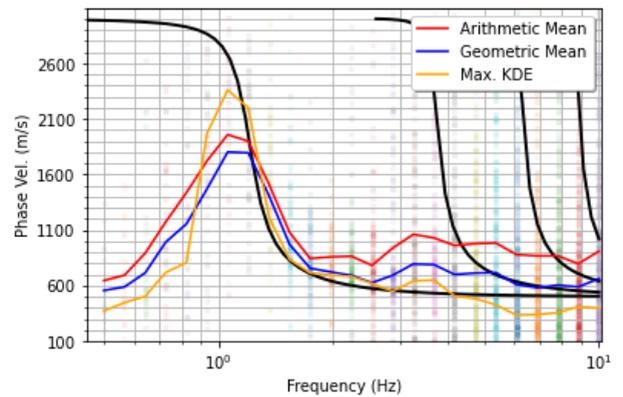


図2 速度構造から計算した理論ラブ波位相速度曲線(黒線、基本モードから高次モード)と6成分波形を用いて計算した位相速度(四角形、色は違う周波数を表す)とその平均(赤線は算数平均、青線は幾何平均、橙色は周波数ごと位相速度の kernel density の最大値に対応した位相速度)。