

## アレー観測された水平動微動の周波数波数解析法による

### Love 波の位相速度の推定 -盛岡市における適用例-\*

岩手大学工学部 坂口智浩

岩手大学理工学部 山本英和, 齋藤剛

#### 1. はじめに

地震時の揺れやすさを評価するために、地盤の S 波速度構造を把握することが重要である。現在、浅部地盤の S 波速度を把握するために、微動の上下動成分を利用した微動アレー探査を行うことが多く (Okada, 2003)、水平動成分はあまり利用されていない。これは、微動に含まれる表面波のうち Rayleigh 波の分散曲線を利用して S 波速度構造を求めるためである。微動の水平動に含まれる Love 波は識別することが容易ではなく、ほとんどの探査の実用レベルでは利用されていない。しかし、Rayleigh 波は地盤の S 波速度だけでなく P 波速度の影響も受けるため、純粋に S 波速度だけの影響を受ける Love 波の利用が実用化されれば単純に精度向上が期待されるだけでなく、構造の逆解析時の不確定さを減らすことが期待される。水平動解析には齋藤 (2007) による水平動微動の周波数波数解析法を適用した手法がある。ただし、3 成分微動の研究報告は微動計の台数制限の理由などから少なく (藤根ほか, 2014)、観測・解析事例を増やして、機器の配置方法、解析方法などの改良が必要とされる段階である。速度構造モデル推定の条件として水平動成分を用いることができれば、より正確な速度構造モデルを推定することができる。昨年度の岩手大学理工学部グラウンドで観測された微動データの観測 (山本ほか, 2017) では、齋藤 (2007) の水平動 FK を用いて Love 波の位相速度を利用する微動アレー探査の有効性が示された。本研究では岩手県営運動公園で各種形状のアレーを使用して水平動微動を測定し、水平動の Love 波位相速度を算定し、手法の適用性を検討する。

#### 2. 微動アレー観測

微動アレー観測は、微動計を平面的に展開したアレーで同時に観測し、微動に含まれる表面波の位相速度を算出し、その分散関係を満足する地下 S 波速度構造を推定する手法である。本研究で用いた微動データは 2017 年 5 月から 6 月の間に最大 6 時間の観測を 6 日間、岩手県営運動公園で観測された。真北から東へおよそ 3 度傾いた道路を Y 軸、直交する道路を X 軸と

---

\*Estimation of phase velocities of Love wave from array records of horizontal microtremors by using FK analysis- An experiment in Morioka area- by T. Sakaguchi, H. Yamamoto and T. Saito

し、アレー配置は幅広い波長をカバーすることを想定し、三角形やL字、T字など様々な形状、地震計間隔の配置で観測を行った。使用した微動計は、白山工業株式会社製の三成分加速度計 (JU310) である。サンプリング周波数は 200Hz、時刻は GPS により同期している。

### 3. 周波数波数解析法

本論文で用いた解析法は、Capon (1973) が考案した最尤法 (MLM) による FK スペクトルの推定法を齋藤 (2007) が多成分に拡張し、水平動二成分のアレー観測から縦波 (longitudinal) 成分と横波 (Transversal) 成分を分離する方法である。

以下に齋藤 (2007) に基づいて手法を説明する。

空間フィルターの係数を  $a_j$ ,  $b_j$  ( $j=1, \dots, N$ ) とする。

ただし、 $N$  は観測点数である。これらの係数を観測された直交する水平二成分にかけると、出力  $w$  は、

$$w(\omega) = \sum_{j=1}^N (a_j u_{xj}(\omega) + b_j u_{yj}(\omega)) \quad (1)$$

と表される。ここで  $u_x$ ,  $u_y$  は観測される微動の水平二成分の  $x$  成分,  $y$  成分を表している。ラグランジュ乗数法を用いて条件付最小問題として解くと、求まる FK スペクトル  $P(\omega, \mathbf{k})$  は、

$$P(\omega, \mathbf{k}) = 1/\{\mathbf{e}\}^T [\mathbf{S}]^{-1} \{\mathbf{e}\}^* \quad (2)$$

で表現できる。ただし、 $*$  は転置して複素共役を取るというエルミート転置を意味している。クロススペクトル行列  $[\mathbf{S}]$  は Radial 成分, Transverse 成分どちらの場合も

$$[\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} E[u_{xj}\bar{u}_{xl}] & E[u_{xj}\bar{u}_{yl}] \\ E[u_{yj}\bar{u}_{xl}] & E[u_{yj}\bar{u}_{yl}] \end{bmatrix} \quad (3)$$

で表される。 $\bar{\quad}$  は複素共役を意味している。

Radial 方向の場合、 $\{\mathbf{e}\}$  は (4) 式で表される。

$$\{\mathbf{e}\} = [(k_x/k)e^{-ik\cdot r_1}, \dots, (k_x/k)e^{-ik\cdot r_N}, \\ (k_y/k)e^{-ik\cdot r_1}, \dots, (k_y/k)e^{-ik\cdot r_N}]^T \quad (4) \\ (j=1, \dots, N, l=1, \dots, N)$$

Transverse 成分の場合、 $\{\mathbf{e}\}$  は (5) 式で表される。

$$\{\mathbf{e}\} = [(-k_y/k)e^{-ik\cdot r_1}, \dots, (-k_y/k)e^{-ik\cdot r_N},$$

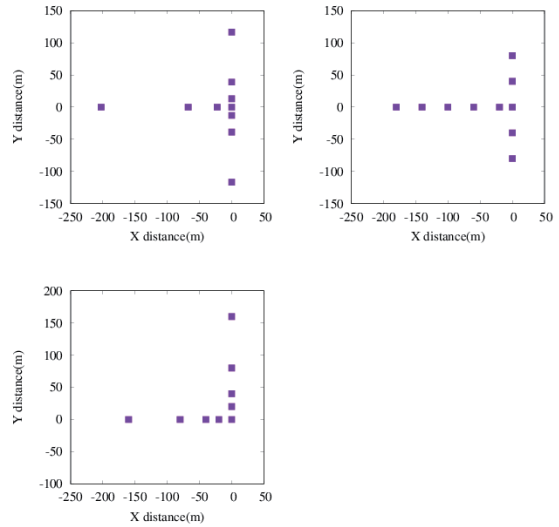


図1 アレー配置図

$$(k_x/k)e^{-ik \cdot r_1}, \dots, (k_x/k)e^{-ik \cdot r_N}]^T \quad (5)$$

(j=1, \dots, N, l=1, \dots, N)

となる。また、 $T$ は転置行列を意味している。詳しくは齋藤 (2007) を参照されたい。

#### 4. FK スペクトル

本研究では水平二成分において基本区間 40.96 秒ごとに FFT によりクロススペクトルを求め、齋藤 (2007) の手法により FK スペクトルを計算した。FK スペクトルを  $k_x$  軸方向、 $k_y$  軸方向で  $\pm k_{max}$  の範囲において計算した。

$$k_{max} = \frac{1000}{2 \times \text{最小地震計間隔[m]}} \quad [1/km] \quad (6)$$

また、FK スペクトルのピークを示した波数から、その周波数における位相速度  $V$  は

$$V = \frac{f}{|k|} \quad (7)$$

で表される。なお、 $f$ は周波数、 $k$ は波数である。FK スペクトルのピークの位置から、波の到来方向とどのような強さの波が来ているのかを読み取ることができる。

#### 5. 位相速度の推定

図 2, 3, 4 は周波数波数解析法により求めた Vertical 成分, Radial 成分, Transverse 成分それぞれの位相速度分散曲線である。30 分間観測された微動データを 40.96 秒ごとに分割し、クロススペクトルを平均し FK スペクトルを得て、位相速度を求める。図では 30 分毎に求めた全ての位相速度を示す。位相速度分散曲線は各周波数の FK スペクトルのピークを読み取り、位相速度の変化を読み取ることができる。また位相速度分散曲線の範囲は、アレー半径における有効な波長の範囲が地震計間隔によって決まっており、下限は空間エイリアジングを防ぐため最小地震計間隔の 2 倍とし、上限は最大地震計間隔の 2 倍とする。位相速度は本研究で行った各種形状アレーによる全微動データをプロットしている。図中の黒線は浅部を大橋 (1999)、深部を J-SHIS の地下構造モデルを地下構造モデル (a) とし、地下構造モデル (a) の基本モードを計算したモデル位相速度とする。モデル位相速度と観測位相速度をそれぞれの成分で比較した。

図 2 に Vertical 成分における位相速度分散曲線を示す。観測 Rayleigh 波位相速度とモデル Rayleigh 波位相速度を

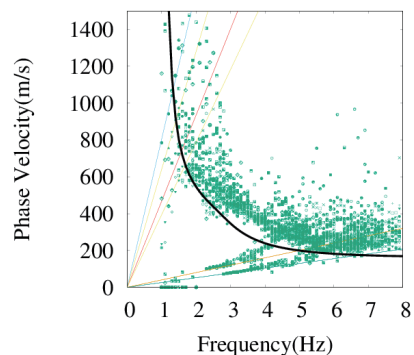


図 2 Vertical 成分における位相速度分散曲線

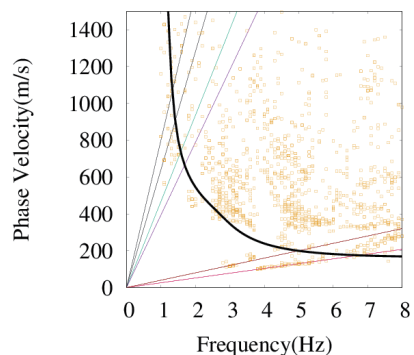


図 3 Radial 成分における位相速度分散曲線

比較すると、傾向がよく一致しているが、全体的に観測位相速度のばらつきが大きく全体的に速度が高い。

図3に Radial 成分における位相速度分散曲線を示す。観測 Rayleigh 波位相速度のばらつきが大きくモデル Rayleigh 波位相速度と一致していない。

図4に Transverse 成分における位相速度分散曲線を示す。観測 Love 波位相速度とモデル Love 波位相速度を比較すると、2Hz以下でよく一致していることがわかる。このことから岩手県営運動公園においても水平動微動から Love 波を検出することができたと推察する。また一致した分散曲線とは別の連続性の高い分散曲線が高い位相速度で見られる。

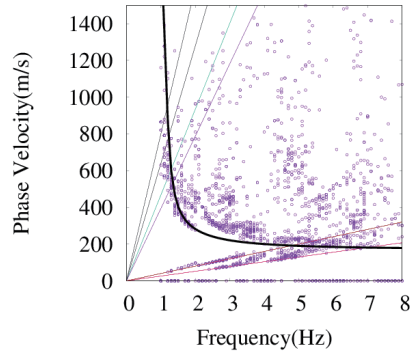


図4 Transverse 成分における位相速度分散曲線

6. 地下構造推定

Vertical 成分, Radial 成分ではばらつきが大きく, Transverse 成分では速度が高い連続した分散曲線が検出されたことから, 観測した地盤内で地下構造が変化したと推測し, 道路の X 軸 Y 軸方向で円周上の三点三角形アレーを複数配置し (チェーンアレーと呼称), SPAC 法を用いて位置と周波数に対する位相速度を算出した。一度に 10 台の微動計を, X 軸方向は全長 196m, Y 軸方向は全長 364m の範囲で配置し, 30 分間の観測を複数回行った。図5に SPAC 法に用いた地震計配置を示す。図6に X 軸 Y 軸それぞれの Vertical 成分における Rayleigh 波位相速度を示す。Y 軸方向の位相速度構造は距離によって大きく変化していないことがわかる。しかし X 軸方向の周波数 3Hz から 7Hz において, 距離 -30m から -150m の位相速度が徐々に低下していることがわかる。やはり X 軸側では地盤が変化していると考えられるので, 観測位相速度と一致するような地盤の地下構造 (b) を推定した。図7に推定した地下構造モデルを示す。

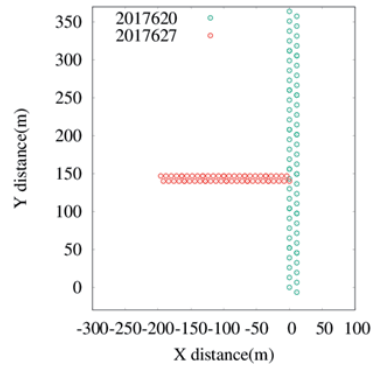


図5 チェーンアレー配置図

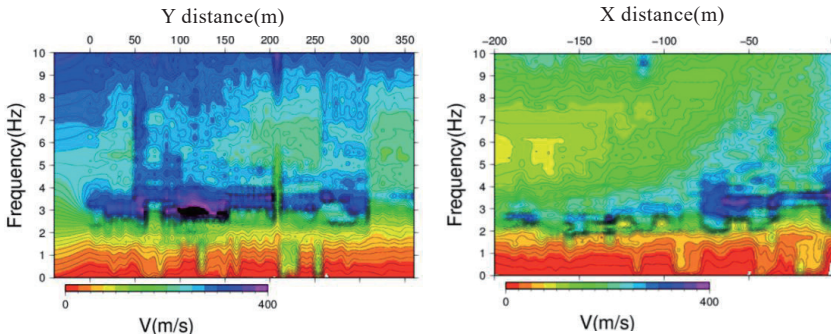


図6 チェーンアレーによる位相速度分散曲線の空間変化

## 7. アレー配置別の比較

山本ほか（2017）で観測された微動データの解析では三角形アレーが用いられ、よい結果が得られた。よってアレー配置によって精度に差が出るのか比較した。図 1 に今回観測したそれぞれのアレー配置を示す。そして図 8 に上から Vertical 成分, Radial 成分, Transverse 成分それぞれのアレー配置ごとの位相速度分散曲線を示す。Vertical 成分において全てのアレー配置でモデル位相速度と広い周波数帯で傾向が一致していることがわかる。Radial 成分において全てのアレー配置でばらつきが大きいことがわかる。Transverse 成分においてばらつきは多少あるがモデル位相速度とかなり一致した観測位相速度が全てのアレー配置で見られる。よって三角形アレー配置以外でも三角形アレー配置と同程度の精度で観測ができた。

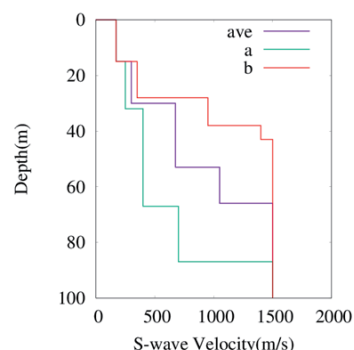


図 7 地下構造モデル

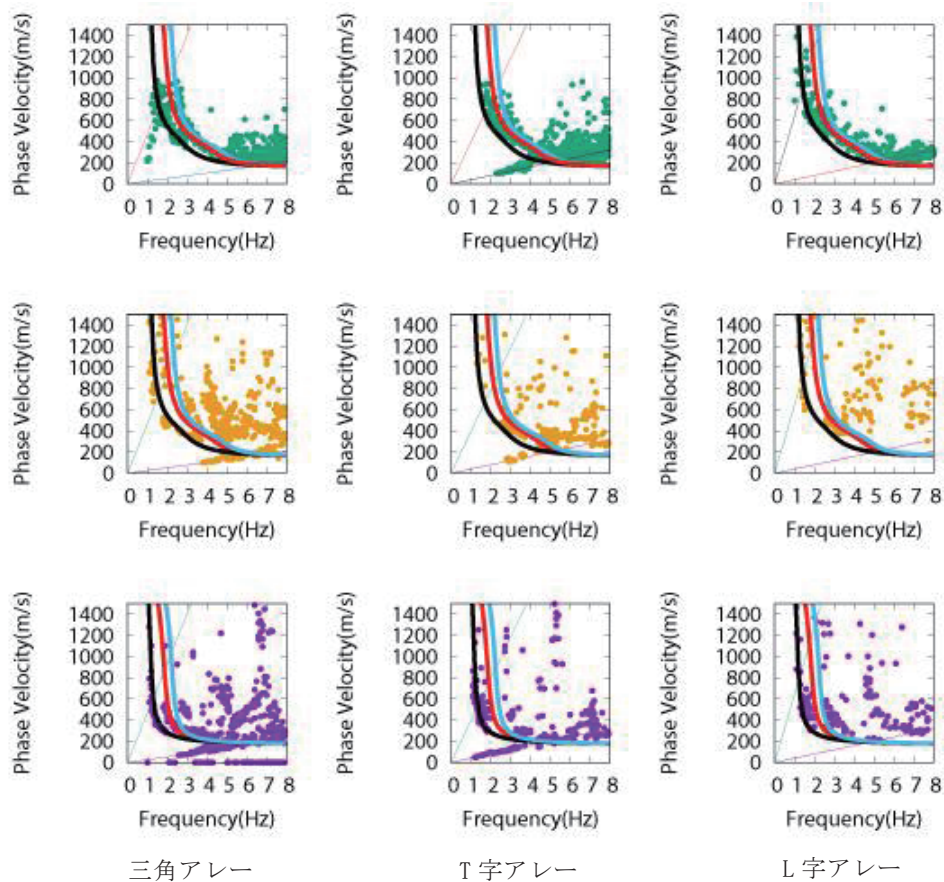


図 8 位相速度分散曲線

## 8. 考察とまとめ

本研究では齋藤（2007）の手法を用いて、Transverse 成分における Love 波位相速度を算定し手法の適用性の検討、各種形状のアレー配置で三成分それぞれの位相速度を求めアレー配置ごとの精度の比較を行った。Transverse 成分の Love 波位相速度では 2Hz 以下でモデル位相速度と傾向が一致した観測位相速度を検出することができた。しかしばらつきが大きい周波数帯があることや、速度が高い連続した分散曲線が検出された。これは地盤の空間変化によるものだと考えられる。本研究ではチェーンアレーによる SPAC 法を用いることで地盤の空間変化の可能性を示唆されたが、今後は小さいアレー配置で FK 法を広い範囲で行い、大まかな地盤の速度構造を求める必要がある。本研究では観測した位相速度から観測した地盤の S 波速度構造を推定することができた。

アレー配置別の比較では三角形アレー配置以外でも同程度の精度で位相速度を検出することができた。

## 謝辞

（国研）防災科学技術研究所から微動計をお借りしました。記してここに謝意を表します。

## 参考文献

- Capon, J. (1973) : Signal Processing and Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis for a Large Aperture Seismic Array, in Method in Computational Physics, 13, 1-59
- 藤根友博, 山本英和, 齊藤剛, 高倉恵 (2014) : 周波数波数法と空間自己相関法による水平微動に含まれる Love 波の位相速度推定の検討～岩手大学における例～公益財団法人 物理探査学会 第 131 回学術講演会論文集 126-128
- Okada. H. (2003) : The Microtremor Survey Method, Geophysical Monograph Series, No. 12, Society of Exploration Geophysicists, 135
- 大橋玄昌 (1999) : 三成分微動アレー観測システムの構築とその地下構造探査への応用, 岩手大学大学院工学研究科修士論文
- 齋藤正徳 (2007) : 水平二成分アレーを用いた縦波・横波成分の分離, 物理探査, 60, 297-304
- 山本英和, 金崎慶次, 齊藤剛 (2017) : アレイ観測された水平動微動の周波数波数解析法による Love 波位相速度の推定, 物理探査学会 第 136 回学術講演会論文集 51-54