

I - B82 地下構造推定に用いる2点間空間自己相関法についての基礎的研究

芝浦工大 正会員 紺野克昭

1. はじめに

地盤振動特性を考える上で、地盤のS波速度構造は非常に重要である。しかし、任意の地点において、S波速度構造を正確に推定することは手法的にも予算的にも非常に困難である。予算的に有利な方法として、微動のアレイ観測に基づく地下構造推定方法がある。これは、上下成分の微動に含まれるレイリー波の位相速度を抽出し、これを説明する地下構造を求める方法である。通常、アレイ観測は四方八方から到来する微動を偏りなく捉えるため4台以上のセンサーを設置することが望まれる。しかし、4台以上を設置し、観測することはそれほど容易ではない。そこで、本研究では、2個のセンサーだけでレイリー波の位相速度を求められるかどうか、理論的および観測的に検討する。

2. 2点間空間自己相関法の理論

位相速度の推定には、空間自己相関(SPAC)法を用いる。地下構造推定に SPAC 法を用いる場合、微動の空間・時間的な定常性、基本モードが卓越している、などの条件が必要となる。この条件が満たされている場合、2点間のコヒーレンス coh は以下のように書くことができる。

$$\text{coh}(\omega, r) = \frac{\sum_{j=1}^M P_j(\omega) \exp(ikr \cos \varphi_j(\omega))}{\sum_{j=1}^M P_j(\omega)} \quad (1)$$

ここで、 $i = \sqrt{-1}$ 、 ω は角振動数、 r はセンサー間の距離、 k は基本モードレイリー波の波数、 M は微動の到来方向の個数、 φ_j は微動の到来方向、 P_j は φ_j から到来する微動のパワースペクトル振幅である。一方、引数を kr とした第1種0次のベッセル関数 J_0 を級数表示すると次式ようになる。

$$J_0(kr) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{j=1}^N \cos(kr \cos \theta_j)}{N} \quad (2)$$

ただし、 θ_j は区間 $[0, 2\pi]$ で一様分布しているとする。式(1)、(2)より、コヒーレンスの実数部 $\text{Re}[\text{coh}]$ がベッセル関数 J_0 の級数表示と類似した形となっていることが分かる。実際、SPAC 法では $\text{Re}[\text{coh}] = J_0(kr)$ とおくことにより位相速度 ($c = \omega r / J_0^{-1}(\text{Re}[\text{coh}])$) を求めている。以下では、 $\text{Re}[\text{coh}]$ の取り得る範囲を考える。まず、次式を満たす関数 $\varepsilon(kr, \varphi_j)$ を定義する。

$$\cos(kr \cos \varphi_j) = J_0(kr) + \varepsilon(kr, \varphi_j) \quad (3)$$

式(3)を式(1)に代入して整理すると次式が得られる。

$$\text{Re}[\text{coh}(\omega, r)] = J_0(kr) + \frac{\sum_{j=1}^M P_j \varepsilon(kr, \varphi_j)}{\sum_{j=1}^M P_j} \quad (4)$$

式(3)、(4)より、微動の到来方向やパワースペクトル振幅に関わらず、 $\text{Re}[\text{coh}]$ の取り得る範囲は以下の通りとなる。

$$\cos(kr) \leq \text{Re}[\text{coh}(\omega, r)] \leq 1 \quad (5)$$

図1に $J_0(kr)$ 、 $\cos(kr)$ を示す。同図から2点のみのアレイ観測では位相速度の推定誤差が大きいことが予想される。なお、同図には正三角形の頂点及び、重心にセンサーを配置したアレイ観測(センサー4台)における $\text{Re}[\text{coh}]$ の理論的に取り得る範囲も示してある。上述した条件が満たされていれば、4点アレイでは精度良く位相速度が求められることが推察される。ただし、式(1)、(2)より、2点アレイでも微動が等方的であれば $\text{Re}[\text{coh}] \approx J_0(kr)$ となることが分かる。しかし、微動が全ての観測場所・時間、振動数範囲で等方的である保証はどこにもない。そこで、本研究では2点アレイ観測から求まる各振動数での $\text{Re}[\text{coh}]$ の最小値 $\min[\text{Re}[\text{coh}]]$ を $\cos(kr)$ とおき、次式のように位相速度 c を求めてみた。以下では、この方法を2点間自己相関法と呼ぶことにする。次章では、アレイ微動記録への適用例を示す。

$$c(\omega) = \omega r / \cos^{-1}(\min[\text{Re}[\text{coh}(\omega, r)]]) \quad (6)$$

なお、盛川ら¹⁾は2点間アレイを繰り返すことにより位相速度を求める2sSPAC法を提案しているが、本提案手法は、2点間のアレイ観測一回のみで位相速度を求める方法である。

キーワード：S波速度構造、微動、レイリー波、空間自己相関法、位相速度

連絡先 〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14, Tel:03-5476-3046, Fax:03-5476-3046, E-mail:konno@sic.shibaura-it.ac.jp

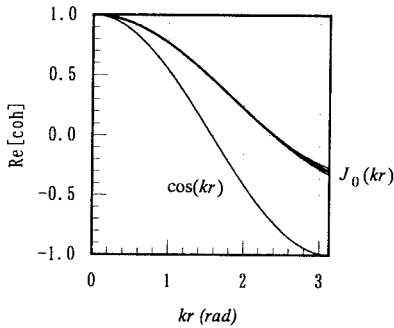


図1 ベッセル関数 $J_0(kr)$, $\cos(kr)$
($J_0(kr)$ の上下の曲線はセンサー 4 台の時の
取り得る範囲を示している)

3. アレイ微動記録への適用例

アレイ微動観測は、江東区豊洲の深川第五中学校の校庭において、99年11月19日(木)、午前6:30-7:00の間に行っている。今回は、7台の上下動速度センサーを図2のように配置し、図中の半径 R を 27.71, 13.86, 6.93m と変えた、3通りのアレイサイズの測定を行っている。大きいアレイ順に、 L, M, S アレイと呼ぶことにする。各アレイでの観測はサンプリング周波数 1000Hz, 65.536 秒間で行っている。

2点間空間自己相関法は、 S アレイの 4 ch - 7 ch ($r=3.1m \approx r_s$), 4-1 ($r=3r_s$), M アレイの 4-7 ($2r_s$), 4-1 ($6r_s$), L アレイの 4-7 ($4r_s$), 4-1 ($12r_s$) の波形データに適用している。コヒーレンスの算出は、波形データ 16384 個を使用を行い、波形データが半分重なるようにずらしながら計 7 区間のコヒーレンスを求めている。なお、この際、バンド幅 1.0Hz の Parzen window を用いている。

図3(a),(b)に S アレイの 4 ch - 1 ch ($3r_s$) と L アレイの 4 ch - 1 ch ($12r_s$) のコヒーレンスの実部 $\text{Re}[\text{coh}]$ のばらつきを示す。両者とも、全体的な傾向としてベッセル関数的に増減しているが、ばらつきは比較的大きいことが分かる。次に、各振動数における最小値 $\min[\text{Re}[\text{coh}]]$ を式(6)に代入し位相速度を求めた結果を図4に示す。印はセンサー間の距離毎に変えてある。図4には FK 法および通常の SPAC 法から得られた位相速度も示してある。また、原点を通る直線は各アレイにおけるセンサー間の距離 r に対してエイリアシングを起こす各振動 f での位相速度 ($=2rf$) を示している。2点間空間自己相関法の結果は、SPAC 法の結果と比較的一致していることが分かる。

4. さいごに

今回提案した手法は、労力の少ない2点間のアレイ観測の微動記録を用いるので、実際の適用は非常に容易であると思われる。今後は、適用例を増やし、適用限界について検討する予定である。

謝辞：アレイ微動観測では、芝浦工科大学地震防災研の保谷則幸君をはじめとする多くの学生のご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献：盛川ほか：やや長周期微動の2点同時観測記録によるアレイ観測法、第53回土木学会年次講演会。

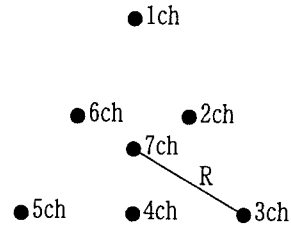
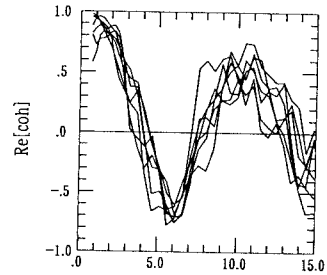
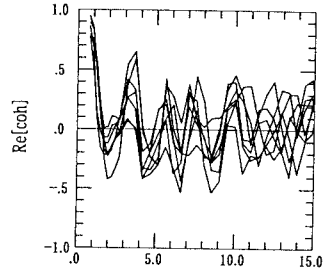


図2 アレイ配置図



(a) S アレイの 4ch-1ch ($3r_s$)



(b) L アレイの 4ch-1ch ($12r_s$)

図3 2点間のコヒーレンスの実部 ($\text{Re}[\text{coh}]$)

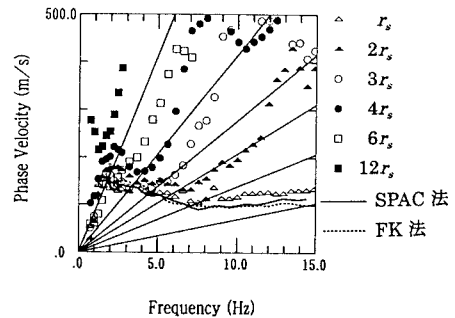


図4 2点間空間自己相関法の適用例