

線状アレイ観測による Rayleigh 波位相速度推定法に関する考察

福井大学工学研究科 正会員 ○小嶋 啓介
元福井大学工学部 非会員 森谷 嘉文

1. まえがき

常時微動のアレイ観測による地下構造探査が一般化しつつあるが、地表から深部までの地下構造を推定するためには、数種類の半径の同心円観測を必要とするため広い敷地が必要になり、観測可能な場所が限られる欠点があった。これに対し、道路などで観測できる2点 SPAC 法や L 字型アレイ法が提案されているが、円形アレイに比較すると信頼性や冗長性が低い傾向が指摘されている。本報告では、線状に配置したセンサーデータのみから位相速度を求める線状アレイ観測法を提案し、従来の方法と比較することによって、その妥当性を検証する。

2. 線状アレイ観測による位相速度算出法

正三角形配置の空間自己相関係数は、中心 X と頂点 Y の距離を R、周波数 f、各点の観測微動のパワースペクトル S_X , S_Y 、クロススペクトルを S_{XY} として次のようにかける。

$$\rho(f, R) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{1}{N_w} \sum_{k=1}^{N_w} \frac{\text{Re}[S_{XY}^k(f, \theta)]}{[S_X^k(f, \theta) S_Y^k(f, \theta)]^{1/2}} \quad (1)$$

ここに、k と N_w は観測継続時間から切り出した解析区間番号とその個数である。上式より、空間自己相関

係数を求める過程で、中心と各頂点という空間方向ならびに解析区間という時間方向でコヒーレンスの平均化が二重に行われ、この操作が、空間自己相関係数ひいては位相速度を安定的に算出する要因の一つと考えられる。

SPAC 法では、微動の空間的・時間的定常性を仮定しているが、ここでは、微動振源がアレイ中心から見て一方向に分布している場合（固定式発電機が稼働しているイメージ）と、時間的に等方的に分散している場合（自動車がアレイの円周方向に走向しているイメージ）を考える。解析区間の平均を行うことは、前者の場合は一方向からの微動情報がスタッキングされ、ノイズ除去と信号増幅が行われ、後者では、振源が時間毎に異なった方向にあるので、方位平均に近い演算を行っていると思ふことが可能であろう。本報告では、拡張 SPAC 法に上記の仮定を組み込んで、図 1 のような線状配置アレイを用いて Rayleigh 波位相速度を算出する方法の検討を行う。同図の①の微動計を固定し、微動計⑤までの距離 R_{1k} が等比数列的となるように線状に配置する。例として微動計を 5 台使用し、公比を $-\sqrt{3}$ とし、 R_{12} を 1m とする小アレイと、 R_{12} を 9m とする大アレイを設定する。この場合、微動計間の距離の組み合わせは、 $2 \times {}_5C_2$ の 20 通りで、最小間隔 1m から最大間隔 73.8m まで、微動計間距離が離散的に配置される。拡張 SPAC 法の考え方に従い、線状アレイ観測で得られた空間自己相関係数の、周波数成分ごとの観測値と理論値の誤差である次式を最少化するように Rayleigh 波の位相速度を算出する。

$$J_f = \sum_{j=1}^{N_R} (\rho^O(f, R_j) - \rho^C(f, R_j))^2 \quad (2) \quad \text{ここに、} \rho^O: \text{周波数 } f, \text{ 距離 } R_j \text{ の空間自己相関係数, } \rho^C \text{ は}$$

対応する理論値であり、振動源が一方向の場合は $\cos(2\pi \cdot f \cdot R_j \cos \phi / C_R(f))$ 、均等に配置されている場合は第 1 種 0 次の Bessel 関数で $J_0(2\pi \cdot f \cdot R / C_R(\omega))$ として求める。

3. モデルおよび実地盤での適用結果

表 1 に示す速度構造を持つモデル地盤を想定する。図 1 に示した直線アレイに、Haskell の方法で算出された Rayleigh 波位相速度で波が伝播するものとする。ここでは簡単のために、周波数 0.1~10Hz の範囲で単位振幅と

表 1 モデル地盤の想定構造

層	層厚	密度	Vs	Vp
1	20	1.8	200	1500
2	80	2.0	600	2000
3	-	2.4	2000	3500

キーワード：常時微動、線状アレイ観測、Rayleigh 波位相速度、拡張 SPAC 法、逆解析
〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1 福井大学工学研究科

ランダム位相を持つ正弦波の集合が平面波として伝播すると仮定した。はじめに、 $\phi = 30^\circ$ 方向のみに振動源を設定した場合を考える。図 2 のプロットは 2~8Hz 成分の距離ごとの観測空間自己相関係数を示す。図 1 に示すアレイ配置により、少ない機器で微動計間隔を分散的に幅広く設定できることが分かる。微動計①を中心として、アレイ全体を仮想的に回転させながら、方向ごとに式(2)を最少化する位相速度を算出する。図 2 の実線は、アレイを 30° 回転させたときの、式(2)を最少化する位相速度によるコヒーレンスの理論値である。広い微動計間距離にわたって観測値が正確に再現されている。図 4(a)は、アレイを 0,30,60 回転させて算出した位相速度と理論値との比較である。アレイを振動源の方向に回転させることにより、位相速度が正しく求められており、支配的な振動源方向が明確な場合にはこの方法を適用できる可能性がある。次に等方的微動源を仮定し、 ϕ を $0 \sim 85$ 度まで 5 度ごとに振動源を配置し、その合成波が図 1 の線状アレイで観測されるものとした。周波数ごとの空間自己相関係数を図 3 に示す。線状アレイ観測と半径を 4,12,40m とした正三角形アレイ観測で求められた位相速度を図 4(b)のプロットで示す。線状アレイは三角形配置と同様に、実線で示す理論値を概ね再現できていることが確認できる。

ここでは実地盤での適用性を検討する。福井大学グラウンドにおいて、図 1 の線状配置と正三角形配置で観測を行い、微動が等方的に到来していると仮定して求めた位相速度を図 5(a)に示す。線状アレイから推定された位相速度は、正三角形アレイおよび実線で示す PS 検層モデルによる理論値に近いことが確認できる。また、同グラウンドでは、 R_{12} を 3m、公比を $-\sqrt{3}$ とした 5 点線状アレイ配置で、東からの角度を $30, 45, 75, 90^\circ$ とした観測も実施した。微動がその方向から到来していると仮定して適用した結果を図 5(b)に示す。この結果から、同地点では一方向振源の仮定は適用が困難であると判断できる。

4. あとがき : 微動源が 1 方向および等方的な場合には、線状アレイ観測により Rayleigh 波位相速度が算出できることを確認した。今後は、微動の到来方向ごとのエネルギー分布に応じて対応できる方法を検討する必要がある。なお本研究は、科学研究費補助費 25420479 の援助を得て実施した。

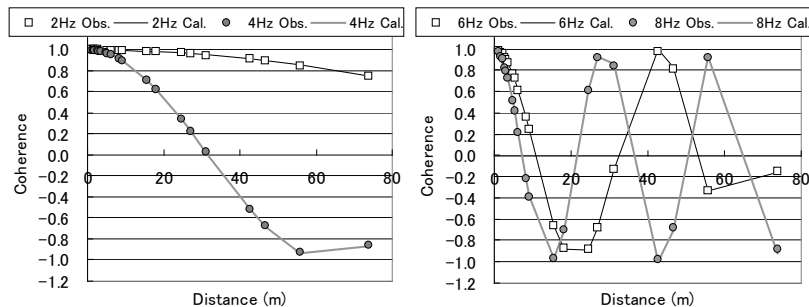


図 2 単一方向振源での空間自己相関係数の比較

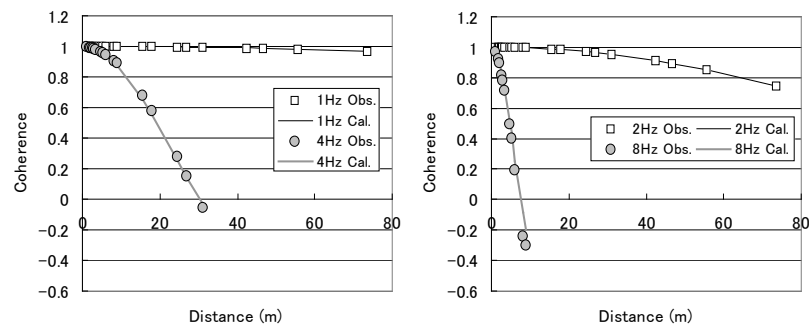
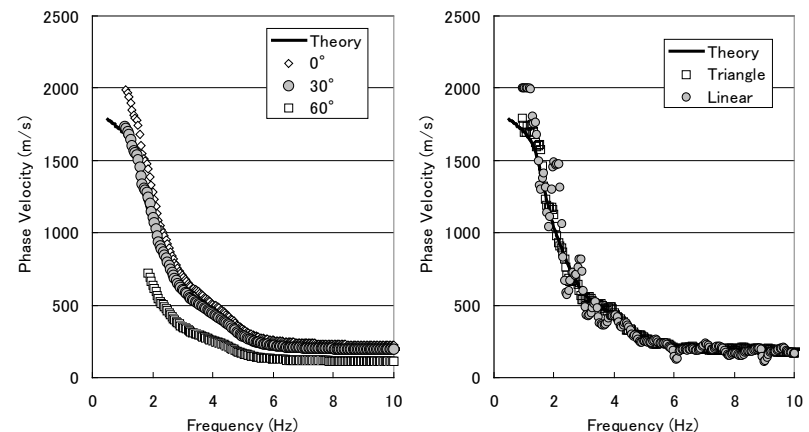


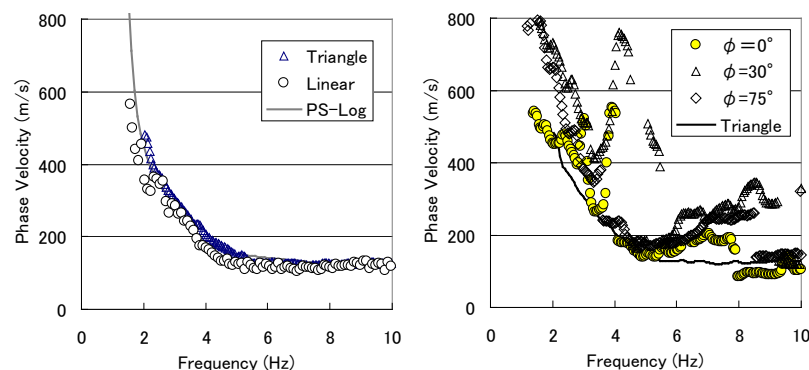
図 3 等方振源での空間自己相関係数の比較



(a) 1 方向振源

(b) 等方振源

図 4 線状アレイ観測による Rayleigh 波分散曲線



(a) 等方振源の仮定

(b) 1 方向振源の仮定

図 5 福井大学グラウンドの Rayleigh 波分散曲線