

微動の2点同時観測による位相速度の推定のための基礎的研究

— 首都圏における実観測記録を用いた検討 —

盛川仁¹, 大堀道広², 飯山かほり³

- 1) 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 人間環境システム専攻, morika@enveng.titech.ac.jp
- 2) 海洋研究開発機構, ohorim@jamstec.go.jp
- 3) 東京工業大学 都市地震工学センター, iiyama.k.aa@m.titech.ac.jp

1. はじめに

微動を用いて地盤構造を推定するという事は、これまでにも広く行われてきた。2地点同時観測に基づく簡易なアレー観測により、位相速度をどの程度正確に推定可能であるかを検討するために、首都圏にいくつかの観測点を設定し、微動を測定した。2点同時観測のみによる簡易なアレー観測が実用的な精度を有するものであることが確認されれば、首都圏のような広いエリアの地盤構造の推定に大きく貢献するものと期待される。

微動のアレー観測では4地点または7地点での同時観測を行って、周波数-波数スペクトル法(F-K法)^{1),2)}や空間自己相関法(SPAC法)^{3)~7)}などを用いて位相速度を推定することが行われる。SPAC法においては、円形アレーの中心におかれた観測点と円周上の観測点との空間自己相関の方位平均が位相速度の関数として理論的に表現されている。しかも、その理論展開の過程で、相関の方位平均をとることと、微動が種々の方向から到来する場合に1方向のみの2点同時観測記録の相関を用いることが、互いに同等の結果をもたらすであろうことが理論的に示唆されている。このことより、微動が様々な方向からまんべんなく到来することがわかれば、2地点での同時観測を長時間続けることで通常のアレー観測と同等の結果を得られることが期待される。しかし、実際の微動がどの程度「様々な方向からまんべんなく」到来すれば理論と整合するのか、といった実際の応用のための検討はまだまだ不十分であり、適用範囲についてもあまりはっきりしたことはわかっていない。

一方、短周期領域では微動源として自動車をはじめとする人間生活にかかわる種々の人工的な振動が考えられるため、様々な方向から微動が到来する、と仮定することができる。Chávez-García et al.⁸⁾は30分ほどの観測記録に基づいて方位平均の必要性についての検討を行っており、ある程度短い波長の微動に対しては方位平均なしでも妥当な結果が得られることを示し

ている。さらに、近年、改めて注目されている Seismic Interferometry (地震波干渉法)⁹⁾をもとに、横井・Margaryan¹⁰⁾はSPAC法において方位平均を必ずしも必要としない条件が存在し得ることを解析的に示唆している。

SPAC法の方位平均の必要性に関する具体的な検討は、上記の研究を別にすると、これまでほとんど行われてこなかった。本研究では、地盤構造が明らかになっている地点で2地点での同時観測をもとに位相速度を推定し、それが地盤構造を正しく反映したものであるかどうかを検討するとともに、いくつかの地点に適用した結果を報告する。

2. 観測地点

2地点の同時観測に基づく空間自己相関係数が方位平均をとって得られるそれと同等であるためには、微動が様々な方向から伝播してきていることが必要である。様々な方向から微動が伝播しているという仮定が成立するのは、短周期領域の微動であることが予測されるため、浅い部分の地盤構造がわかっている地点において短周期の微動観測を実施した。

観測場所には、首都圏近郊で浅層のボーリングデータがある地点をリファレンスとして選んだ。また、手法の適用先としてリファレンスとは地盤構造が異なることが予想される地点をリファレンスの近くで2ヶ所選んだ。図-1に観測地点と周辺の微地形区分を示す。図中、No.1のK-NET所沢(所沢市立明峰小学校校庭)がリファレンス地点であり、No.2のSK-net富士見(富士見市役所)およびNo.3の荒川河川敷はNo.1とは異なる地盤条件であることがわかる。

3. 観測システムと観測方法

観測システムとして、固有周期2秒の動コイル型速度計を3成分2セット用いて、No.1~3の各観測点ごとに3成分の2地点同時観測を行った。観測にあたっては、2セットの地震計の間の距離を変化させ、それぞれの地点で4種類の距離を設定して観測を行った。

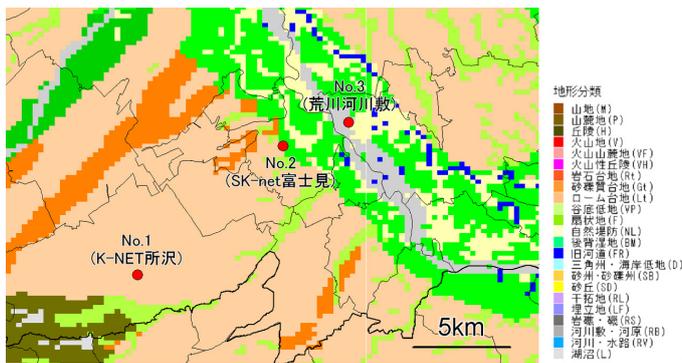


図-1 観測場所と地形分類

記録は、すべての地震計の出力(6成分)を有線で接続し、適当なローパスフィルタおよび増幅機を介して16bit 分解能のデジタルレコーダに信号を入力して記録した。ローパスフィルタのカットオフ周波数は10 Hz, 減衰特性は -12 dB/oct. , サンプル周波数は、観測点間隔が25m 以下の場合1 kHz, 25 m を超える場合は500 Hz とした。また、記録時間は15分以上である。

地震計の位置はGPSによるディファレンシャル測位によって決定し、2地点の相対位置は10mm 以内の精度で決定している。また、やや長周期領域における風の影響を避けるために段ボール箱で風よけをしたうえで観測を行っている。

なお、地震計の設置時の特性を用いて後処理として計器補正を行うために、地震計を設置することに振り子の自由振動とステップレスポンスを記録している。前者については、シャント抵抗をはずした状態で自由振動をさせ固有周期を測定し、また後者についてはシャント抵抗を接続した状態で地震計のコイルに電流を流したり止めたりすることで得られるステップレスポンスの形状から減衰定数を求めている。ステップレスポンスは、各観測の直前に10 回程度ずつ記録し、得られた減衰定数の平均値を当該観測時の減衰定数として採用している。

4. 解析

解析にあたっては、ステップレスポンスから振り子の減衰定数を推定し、観測時に計測した振り子の固有周期とあわせて、得られた微動記録の計器補正を行っている。固有周期2秒の地震計を用いているが、このようにして計器補正を厳密に行うことで、約8秒程度までは振幅、位相とも安定した記録を得られることを確認している。以下の解析結果はいずれも、計器補正を

表-1 No.1 (K-NET 所沢) の速度構造

	S 波速度 [m/s]	密度 [t/m^3]	層厚 [m]
1	130	1.30	4.0
2	180	1.50	7.0
3	355	1.70	5.0
4	835	1.72	∞

行って得られる地動速度に基づいて議論を行っている。

微動記録の解析では、No.1 地点では約16秒, その他の地点では約65秒のノイズが少ないと思われる区間を各観測記録毎に10 区間程度ずつ切り出してフーリエ変換を行い、フーリエスペクトルを求め、水平動と上下動のスペクトル比を計算してH/V を求めた。

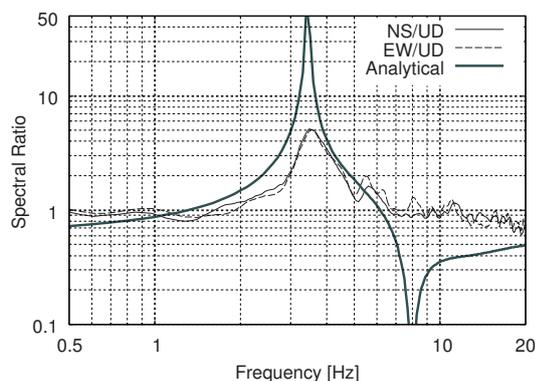
また、同時に観測を行った2地点の記録からクロススペクトルを求め、SPAC 法を適用して(ただし、方位平均はとらない), Rayleigh 波の位相速度を求めた。SPAC 法の適用にあたっては、H/V の計算と同様に、各観測記録毎にノイズが少ないと思われる区間を10 区間程度選んで、各区間ごとに同時に観測を行った2地点の記録のクロススペクトルを求め、すべての区間について算術平均をとり、それを空間自己相関係数とした。ただし、算術平均をとる前にスペクトルの計算において周波数軸方向にHanning フィルタを5回かけて平滑化している。

5. No.1 地点における解析結果

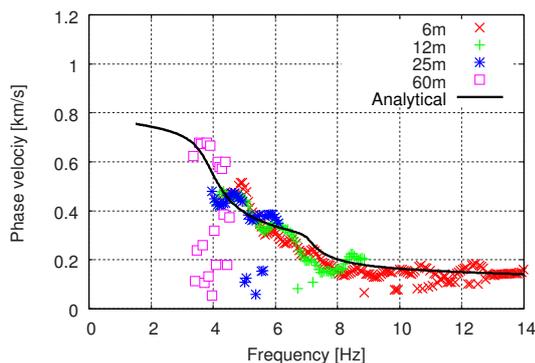
No.1 (K-NET 所沢) 地点はK-NET の観測点であるため、工学的基盤面までのボーリングデータを参照することができる。そこで、No.1 地点における観測記録をリファレンスとして、検討を行う。

No.1 地点のK-NET 所沢(明峰小学校校庭)におけるボーリングデータによって、工学的基盤面までの速度構造が明らかになっており、その速度構造は表-1 に示す通りである。表中の最下層の層厚は不明であるため、便宜上、 ∞ と示している。表-1 の速度構造を用いて Rayleigh 波の ellipticity および位相速度を計算し、観測記録の水平動/上下動スペクトル比(以下、H/V)と比較したものを図-2 に示す。

この図より、観測から得られたH/V や位相速度が理論曲線とよく対応していることがわかる。方位平均をとらない2点のみの同時観測であっても、短周期領域であれば位相速度の推定可能性が示唆される結果と言える。ただし、No.1 地点である明峰小学校での観測



(a) 水平動/上下動スペクトル比 (H/V)



(b) Rayleigh 波の位相速度

図-2: No.1 (K-NET 所沢) における H/V および位相速度とその理論曲線

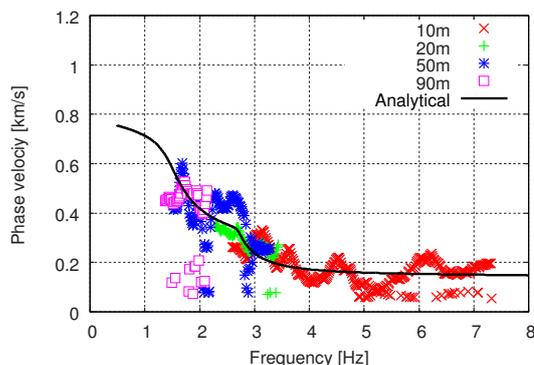
は、観測時間が放課後になったため、生徒たちが校庭で縦横無尽に遊んでおり、様々な方向からの微動がまんべんなく到来する、という理論的に理想に近い状況であったことも良い結果が得られた理由の一つであると考えられる。

6. No.2 および No.3 地点における解析結果

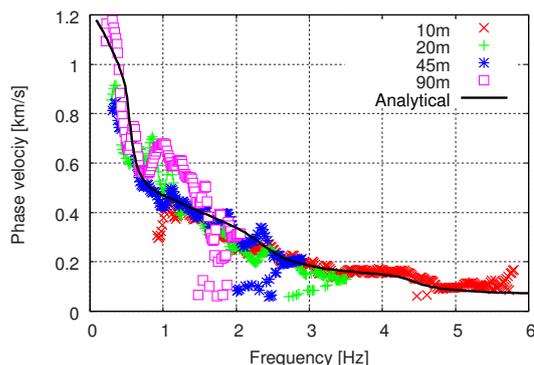
No.1 地点での解析から 2 点の同時観測のみである程度妥当な位相速度を推定可能であることが示された。短周期領域であれば、ある程度は位相速度を推定できそうであるので、この手法を他の地点に適用してみた結果を示す。

図-1 からわかる通り、No.2 (SK-net 富士見) は扇状地、No.3 (荒川河川敷) は文字通り河川敷である。基盤構造も西から東へ向かって深くなることが知られており、No.1 から東へ行くほど、いわゆる「地盤が悪くなる」という傾向にあると考えられる。

各観測地点で推定された位相速度を図-3 に示す。この位相速度を満足する速度構造を推定した結果、表-2、3 に示す構造が得られた。No.3 (荒川河川敷) では非常に長周期領域まで位相速度が推定されているため、それにあわせて深い構造まで推定している。



(a) No.2 (SK-net 富士見)



(b) No.3 (荒川河川敷)

図-3 各観測地点での位相速度と理論分散曲線

表-2 No.2 (SK-net 富士見) において推定された速度構造

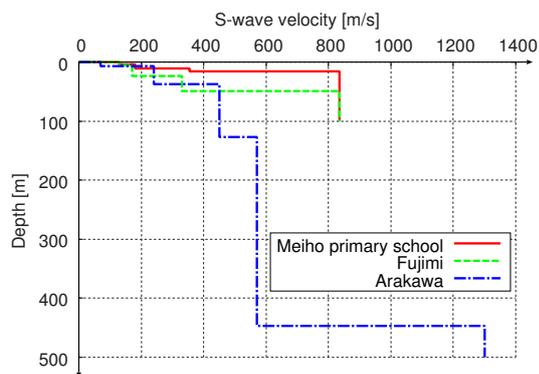
	S 波速度 [m/s]	密度 [t/m ³]	層厚 [m]
1	130	1.30	5.0
2	170	1.50	19.0
3	330	1.70	25.0
4	835	1.72	∞

表-3 No.3 (荒川河川敷) において推定された速度構造

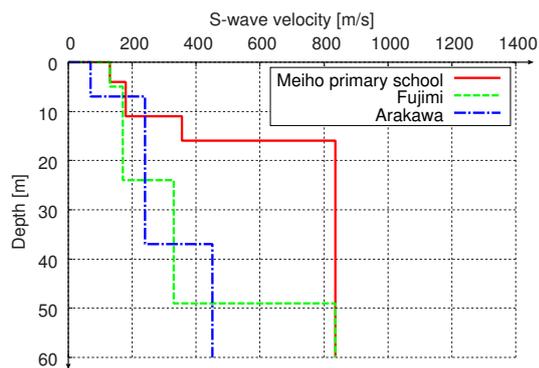
	S 波速度 [m/s]	密度 [t/m ³]	層厚 [m]
1	70	1.25	7
2	240	1.45	30
3	450	1.70	90
4	570	1.72	320
5	1300	1.80	∞

図-3 では No.2 (SK-net 富士見) 地点の位相速度も一応求められているように見えるが、実際には、空間自己相関係数が全周波数帯域で不安定となっており、あまり信頼できる結果ではない。そのため、No.2 地点の速度構造を求めるに当たっては、No.1 の層序を参考にして、観測結果と整合するようパラメータをごくわずが変更してフォワード計算で速度構造を求めている。

一方、No.3 (荒川河川敷) 地点では、比較的安定し



(a) 深さ 500m まで



(b) 深さ 60m までの拡大図

図-4 各観測地点で推定された S 波速度構造

た位相速度が計算され、かつ長周期領域まで安定して位相速度が求められた。しかし、1 秒よりも長周期側については、「いろいろな方向から微動が到来する」という仮定がどの程度信頼できるかよくわからないため、得られた位相速度をどこまで信用すべきかの指標が不十分である。前節での議論では、空間自己相関係数の確率論的性質が理論と整合するかどうか、2 点同時観測から求められた位相速度の妥当性の判断基準になるとは限らないことが明らかとなったため、この点について現時点で確たることを述べることはできない。ただし、一般に、1 秒よりも長周期領域で観測される脈動の震源は海底にあると考えられており、同じような方向から伝播してきていることが多く、「いろいろな方向から微動が到来する」という仮定が常に成立するわけではなさそうである、ということを指摘しておく。周期帯から考えると第 4 層まではある程度信頼できると考えられるが、第 4 層の厚さ、および第 5 層の信頼性は上記の理由により不明である。

No.1~No.3 の各地点での速度構造を図-4 に示す。No.3 に比して No.1 および 2 は非常に浅い構造までしか求められていないので、表層から 60m までを拡大したものをあわせて示している。この図によると、各

観測地点での地盤条件の定性的な違いが速度構造に反映されており、結果が大幅に間違っているということはないものと期待される。

7. おわりに

微動の 2 点同時観測のみによる簡易なアレー観測によって位相速度が推定可能か実観測記録を用いて検討した。すなわち、地盤構造が明らかな場所で微動の 2 点同時観測を実施し、その記録から空間自己相関係数および位相速度を推定した。

この結果、短周期領域において推定された位相速度は、地盤構造から求められる理論分散曲線とよく対応し、空間自己相関係数の方位平均をとらない場合でも、短周期領域ではある程度妥当な位相速度を推定可能であることが示唆された。さらに、他の地点でも同様の簡易な微動アレー観測を実施し、位相速度を推定することができた。

参考文献

- 1) Capon, J.: High-Resolution Frequency-Wave Number Spectrum Analysis, *Proceedings of IEEE*, Vol.57, pp.1408-1419, 1969.
- 2) 堀家正則：微動の位相速度及び伝達関数の推定，地震，第 2 輯，Vol.33, pp.425-442, 1980.
- 3) Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, University of Tokyo, Vol. 35, pp.415-456, 1957.
- 4) 松島健，岡田廣：微動探査法 (2) —長周期微動に含まれるラブ波を識別する試み—，物理探査学会第 82 回学術講演会講演論文集，pp.5-8, 1990.
- 5) Okada, H.: A new method of underground structure estimation using microtremors, *Lecture note for Beijing Graduate School, China Institute of Mining and Technology*, 1992.
- 6) 松岡達郎，梅沢夏実，巻島秀男：地下構造推定のための空間自己相関法の適用に関する検討，物理探査，Vol.49, pp.26-41, 1996.
- 7) Morikawa, H.: A method to estimate phase velocities of surface waves using array observation records of three-component microtremors, *Journal of Structural Engineering / Earthquake Engineering*, Japan Society of Civil Engineers, Vol. 23, No. 1, pp.143s-148s, 2006.
- 8) Chávez-García, F.J., Rodríguez, M., and Stephenson, W.R.: Subsoil structure using SPAC measurements along a line, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 2, pp.729-736, 2006.
- 9) Wapenaar, K. and Fokkema, J.: Green's function representations for seismic interferometry, *Geophysics*, Vol. 71, No. 4, pp.S133-S146, 2006.
- 10) 横井俊明・Sos Margaryan：SPAC 法と Seismic Interferometry の関係について，日本地球惑星科学連合 2007 年大会 予稿集，S150-003, 2007.