

全波動場の Green 関数を用いた短周期微動アレーの解析

大堀 道広¹⁾, 盛川 仁²⁾

1) 海洋研究開発機構 海洋工学センター DONET, ohorim@jamstec.go.jp
2) 東京工業大学 総合理工学研究科 人間環境システム専攻, morika@enveng.titech.ac.jp

1. はじめに

地下構造の推定法として広く用いられている微動アレー探査法では、表面波（主に鉛直成分の観測データに基づく Rayleigh 波）の伝播を仮定し、その位相速度の分散性を抽出した上でこれに適合する地下構造の決定が行われている。浅層地下構造探査の場合には、短周期微動を対象とする解析が行われるが、その振動源としては交通振動・機械振動・建設工事など地表もしくは地表付近にあるものが支配的と考えられる。アレー微動観測では、こうした振動源をアレー内に内在しないように、また地震計の設置位置が振動源に近接しないように配慮されるのが一般的である。

ところで、振動源近傍では表面波よりも実体波の方が卓越すると予想されるが、実体波がどの程度の距離まで影響するかについての検討はほとんど行われていないのが実状である。また、カケヤ、もんけん、起振機などにより人工的に振動を励起させて行われる表面波探査法（Rayleigh 波探査法）では、実体波に比較して表面波が卓越することを前提としており、振動源近傍での実体波に対する考慮は行われぬのが通常である。平面波として伝播する Rayleigh 波を測定するために、振動源からどのくらい離ればよいか（いわゆる offset）は明確な基準が確立されているわけではないが、一つの目安として波長の 1/2 倍以上という考えも見られる [Park et al. (1999)]。この基準に従えば、振動源のパワーと S/N 比などの事由からもっと近距离で Rayleigh 波探査法を実施したい場合には、実体波の影響も考慮した検討をすればよいのか検討する余地があると考えられる。

一方、実体波と Rayleigh 波の比率を定量的に比較した検討例は、斉藤(1993)、時松・田村(1995)などごくわずかである。斉藤(1993)は半無限弾性体を対象として、地表鉛直点加振による地表動における実体波と Rayleigh 波の寄与率を検討している。この斉藤(1993)の研究を発展させる形で、時松・田村(1995)は、表層と基盤層のみからなる 2 層地盤モデルを対象として、地表鉛直点加振による地表動における実体波と Rayleigh 波の寄与率を数値的に検討している。時松・田村(1995)の結論の中で特に興味深い点として、表層と基盤層の S 波速度比が 1.5 倍程度以上の場合には表層地盤の卓越 1 次周波数付近の周波数ではかなり遠方まで実体波の影響が見られること

があげられる。地盤の卓越周波数とその周波数近傍での波動を明らかにすることは、耐震工学や地震防災においてたいへん重要であることから、著者らは、時松・田村(1995)の検討結果をより現実的な多層地盤モデルにおいて数値解析と観測事例の両面から確認しておく必要があると考える。特に、短周期微動のアレー観測における実体波の影響とそれを考慮した解析法の必要性について具体的な検討事例を例示した検討が必要であると考えられる。

以上の事由を背景に、本研究では、浅層地下構造が既知でさらにその成層性が確認されているサイトを対象として、地表面の上下方向点加振による励起される鉛直成分の波動伝播性状に関する数値解析と短周期微動アレーの観測記録の解析を通じて、実体波が与える影響について確認するとともに、実体波と表面波の両方を含む全波動場の Green 関数を利用した解析法の必要性について議論する。

2. 対象サイトの概要

本研究では、浅層地下構造が既知でさらにその成層性が確認されているサイトを対象とする。具体的には、著者らの既往の研究 (Ohori et al., 2002) で検討された（東京都清瀬市の大林組技術研究所敷地内）サイトを対象とする。対象サイトの PS 検層結果を図 1 に示す。この地盤モデルに対して算出された Rayleigh 波の各モードの位相速度とミディアム・レスポンス（波数で基準化したもの）を図 1 に示す。なお、Rayleigh 波に関する計算には、Hisada (1995)の解析コード phs1.fを用いている。図 1(a)の位相速度には、各モードの励起特性を考慮して重ね合わせた見かけの位相速度 [Tokimatsu et al. (1992)] を算出し、●印で重ね書きしている。これより、5~9Hz にかけての高次モードの影響が現れるが、これは図 1(b)に示すミディアム・レスポンスにおいて確認できるように、上述の周波数範囲において基本モードより高次モードの方が卓越するため、これに応じて見かけの位相速度が高次モードのそれに近づくことを意味している。以前に実施した微動アレー観測の解析結果 (Ohori et al., 2002) においても図 1(a)に示す見かけの位相速度に近い結果が確認されている。

3. 数値的検討

3.1 検討の方法

短周期微動の振動源は地表もしくは地表付近にあるため、その波動としては表面波が卓越すると考えられる。アレーの近傍に振動源がある場合には、表面波ばかりでなく実体波も混在していると考えられる。ここでは、対象サイトにおいて、鉛直地表点加振により励起される波動に含まれる実体波と表面波（ここでは Rayleigh 波）の比率について、成層構造の Green 関数に基づき検討する。図 1 に示す地下構造モデルを用いて、振動源から観測点までの距離を 2m から 100m まで 2m 間隔で 50 点とり、水平成層構造の地表における上下方向加振により励起される全波動場と Rayleigh 波の地盤応答の算定を行う。数値解析における振動源と観測点の分布を図 3 に示す。振動源に加えられたインパルスにより観測点で得られる鉛直成分の速度応答を対象とする。全波動場の地盤応答の算定には、Hisada (1995) の解析コード `grpnt1.f` を用いる。また、Rayleigh 波の地盤応答は、Aki & Richards (1980) に従って算出する。実体波の地盤応答は、全波動場の地盤応答より Rayleigh 波の地盤応答を差し引いたものと仮定

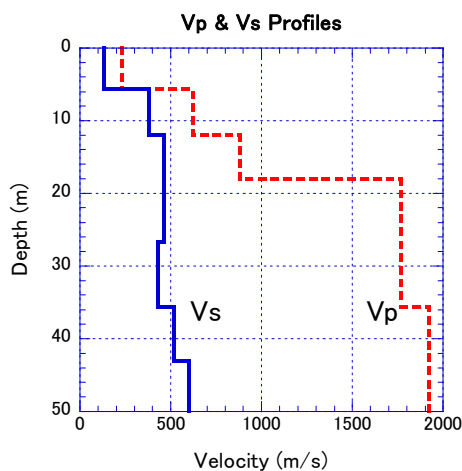


図1：対象サイトにおけるPS検層結果

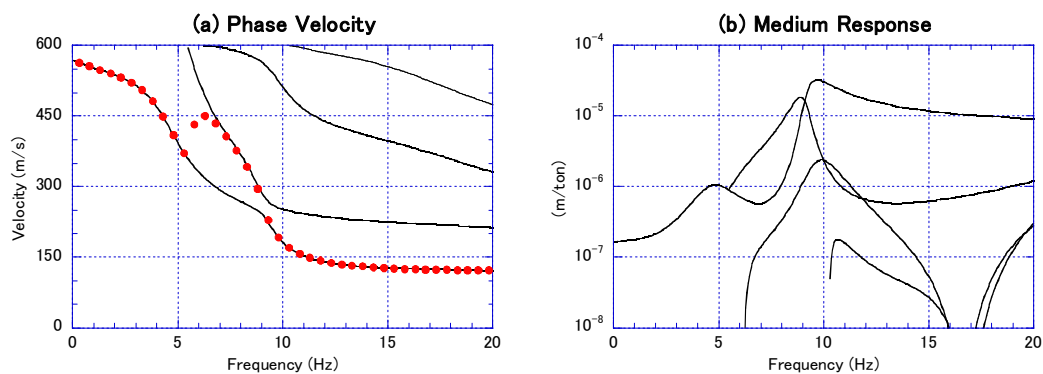


図2：対象サイトにおけるRayleigh波の分散性と卓越する振幅特性

する。この考え方は、時松・田村(1995)と同様である。解析する周波数の範囲は 1~20Hz とする。なお、解析に先立ち、時松・田村(1995)が設定した地盤モデルを用いて彼らの計算結果の再現を試みたところ、完全ではないが同様の結果が得られることを確認している。

3.2 フーリエ・スペクトル

全波動場の地盤応答のフーリエ・スペクトルを図 4(a) に、Rayleigh 波のそれを図 4(b)に示す。同図において、横軸には周波数を 0.05Hz 刻みで取り、縦軸には加振点からの距離を 2m 刻みで取り、構築される各グリッドに対するスペクトル振幅について、距離 20m における Rayleigh 波のピーク値を基準値として、各グリッドを塗り分けている。両図より観察される全体的な印象としては、周波数が高くなるにつれて、あるいは振動源からの距離が離れるにつれて、全波動場と Rayleigh 波のそれぞれの地盤応答が一致する傾向が見られる。さらに注意深く観察すれば、全波動場と Rayleigh 波の各地盤応答に見られる共通点として加振点近傍を除く多くの観測点で 8Hz 以上の周波数範囲の振幅が卓越すること、相違点として加振点近傍では全波動場の方が Rayleigh 波よりも低い周波数範囲まで振幅が卓越すること、等が読み取れる。

3.3 全波動場に対する実体波の割合

全波動場と Rayleigh 波のそれぞれの地盤応答の差を取り実体波の地盤応答を算出した上で、これを全波動場のそれで除したスペクトル比（全波動場に対する実体波の割合）を求めた結果を図 4(c)に示す。同図より、地盤の水平 1 次卓越周波数 (5.8Hz) 付近では、実体波の影響はかなり遠方まで及ぶことが読み取れる。これは、時松・田村(1995)の研究でも指摘された通りである。また、水平 1 次卓越周波数を境として、これより低い周波数帯域では 20m 程度まで実体波の影響が見られる。同様に水平 1 次卓越周波数から 8Hz 付近まで周波数帯域では 10m 程度まで実体波の影響が見られる。

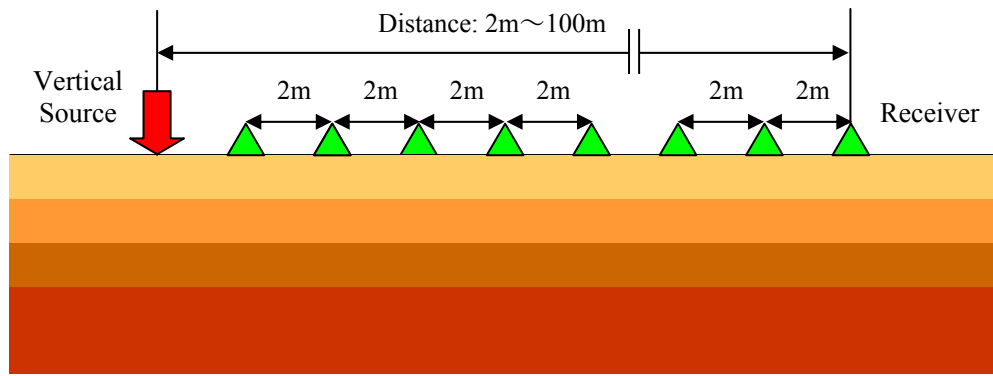
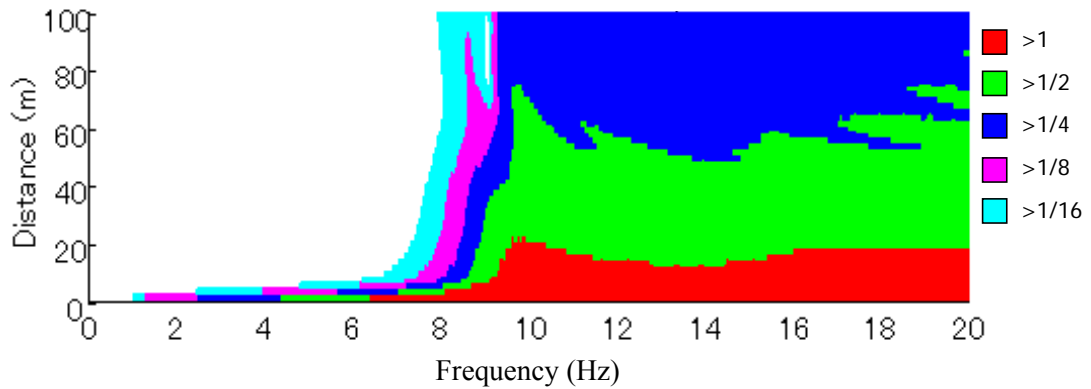
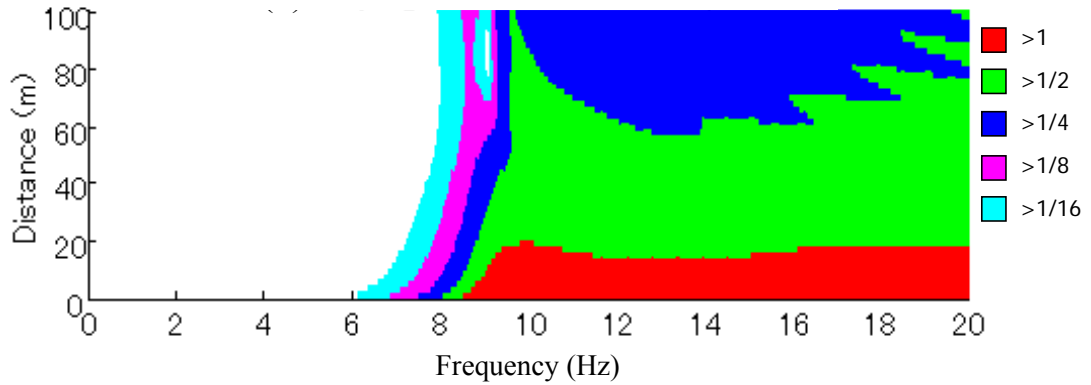


図3：地表面の上下方向加振点と地盤応答の計算地点の分布

(a) Full-Wave Vertical-comp.



(b) Rayleigh Wave Vertical-comp.



(c) Body-/Full-Wave Ratio for Vertical-comp.

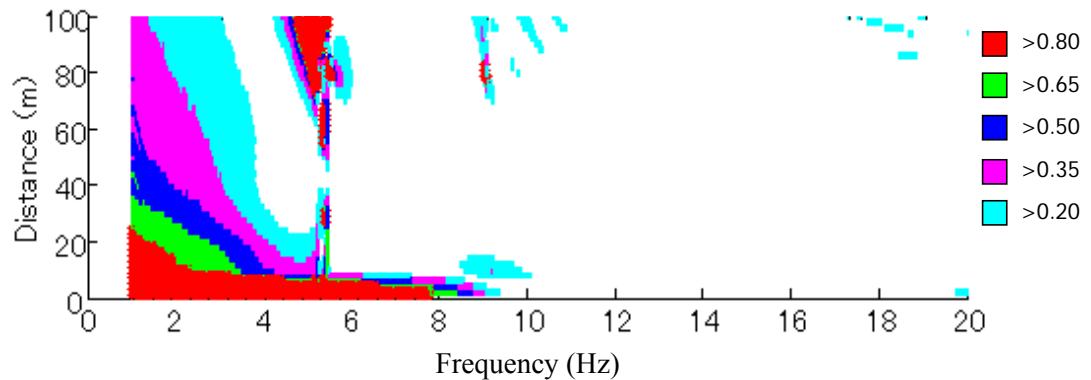


図4：地表面の上下方向加振による地盤応答のフーリエ・スペクトルの空間的分布
 [(a), (b)は距離20 mのRayleigh波のピーク値により基準化している.]

4. 微動アレー観測記録を用いた検討

4.1 微動アレー観測観測の概要

微動アレー観測は、2002年12月に実施している。アレー形状は、図5に示す半径1mの円形アレー（中心1点と円周6点の鉛直動）である。計測には東京測振の携帯用地震計システムを3台用いた。各システムには3台までの地震計を接続し、GPSによるタイムコードを記録することで、測定後に時間の同期を取る。地震計には固有周期5Hzのサーボ型速度計を用いる。システム全体ではおおよそ0.3Hz~20Hzにおいてほぼフラットな総合特性を有する。サンプリング周波数を1000Hzとし、1ファイルを90秒（データ数90000個）とする測定を実施した。地表面の上下方向点加振に用いる振動源には砂袋（30kg）を用い、これを1.2m程度の高さから落下させることで鉛直動の励起を行った。アレー配置は固定したままで、砂袋の落下地点をアレーの中心から南方に10m離れたケース（Case 1）、20m離れたケース（Case 2）、40m離れたケース（Case 3）、以上の3ケースの観測を行った。砂袋の落下は、振動が落ち着くのに十分な時間間隔を取りながら、各ケースごとに計5回実施した。紙面の制約により波形の掲載は割愛するが、最大速度はCase 1から順に、0.08kine、0.02kine、0.005kine程度、同じく継続時間は0.4~0.8秒程度であった。

4.2 解析方法

各観測ケースにおいて、データのシグナル部分とノイズ部分のスペクトル比（S/N比）より、シグナルが卓越する周波数帯域は8Hz以上であるが、水平1次卓越周波数を含む5Hz以上でも解析可能な周波数成分を含むことから、5~20Hz以上を解析対象とする。なお、Case 1、Case 2に比較してCase 3はS/N比が低く、良好な結果が得られていないことから、結果の掲載を割愛する。

アレー観測のデータ解析には、SPAC法〔岡田(1994)〕とCho et al. (2004)に準ずる方法を用いる。各観測ケースにおいて、1回の砂袋の落下による振動を含む約8秒間の時刻歴データ（データ数8192個）を5個作成する。それぞれのデータについて、円中心0と円周上の観測点*n*間のクロス・スペクトル $S_{0n}(f)$ とし、両者のコヒーレンス $C_{0n}(f)$ を、次式にて算定する。

$$C_{0n}(f) = S_{0n}(f) / \{ S_{00}(f) S_{nn}(f) \}^{1/2} \quad (1)$$

なお、クロス・スペクトルの算出の際、幅0.2HzのParzenWindowによる平滑化を行う。続いて、式(1)で算出されるコヒーレンスを円周方向に平均化してSPAC係数を算出する。

$$P_0(f) = \sum C_{0n}(f) / N \quad (2)$$

ここで、*N*は円周上の観測点の総数とし、 \sum は*n*=1~*N*までの総和とする。観測結果より得られるSPAC係数は、5

回の落下実験の平均値とする。通常のSPAC法では、SPAC係数の実部 $real(P_0(f))$ に対して $kr=2\pi fr/c(f)$ (*c*(*f*)は位相速度、*r*はアレー半径)を引数とする $J_0(kr)$ ($J_n(\cdot)$ は第1種*n*次ベッセル関数)との適合を図ることにより *c*(*f*)を推定し、続いて *c*(*f*)を再現する地下構造の推定が行われる。

ここでは、円周上に等間隔に6台の地震計を配置していることから円周方向の積分精度が高いと考え、SAPC法に加えCho et al. (2004)に準ずる方法も試してみる。式(2)を円周方向へのフーリエ変換による0次係数の算定式と見なせば、1次係数の算定式は次式で与えられる。

$$P_1(f) = \sum C_{0n}(f) \exp(-j\theta_n) / N \quad (3)$$

ここで、 θ_n は観測点の方位角を意味する。1次係数の絶対値 $|P_1(f)|$ が *kr* を引数とする $J_1(kr)$ に適合するとして *c*(*f*) を算定する。さらに、0次係数の実部の二乗値と1次係数の絶対値の二乗値の比を、

$$Ratio = real(P_0(f))^2 / |P_1(f)|^2 \quad (4)$$

と定義すれば、これを $J_0(kr)^2 / J_1(kr)^2$ に適合することにより *c*(*f*) が算定できる。本研究では、 $real(P_0(f))$ 、 $|P_1(f)|$ (以後、単に0次係数、1次係数と呼ぶ)、*Ratio* を観測記録より算定するとともに、これらに含まれる実体波の影響を調べるために、図1の地下構造と図5の加振点とアレー配置に対する全波動場とRayleigh波のそれぞれの速度波形を計算し、疑似アレー観測記録を作成し、実際の観測記録と同様の解析を行う数値実験も実施する。

4.3 解析結果

Case 1とCase 2に関する0次係数、1次係数、*Ratio*の計算結果を図6、図7、図8に、*c*(*f*)の推定結果を図9に示す。各図において、●印は観測記録を用いた結果を、薄い実線は全波動場に対する結果を、点線はRayleigh波に対する結果を意味する。また、図9ではさらに□印を用いて観測結果を示すとともに、図2に示す各モードごとの位相速度と見かけの位相速度を重ね書きしている。

まず、図6~図9を概観する。Case 1では実体波の影響により全波動場とRayleigh波のそれぞれの結果に違いが見られ、観測記録を用いた結果は前者によく一致している。Case 2では実体波の影響が少なく、全波動場の結果はRayleigh波のそれに近づき、観測記録による結果も後者に良く一致している。なお、Case 2において1次係数による結果とRayleigh波による結果は、ともに見かけの位相速度に良く一致しており、高次モードの影響が現われていることが確認できる。

次に、0次係数と1次係数による位相速度の推定結果を比較してみる。図9より、Case 1の7Hz以上とCase 2の9Hz以上の高い周波数帯域では、0次係数による位相速度と1次係数による位相速度はほぼ一致している。しかし、それ以下の低い周波数帯域では、0次係数による位相速度は周波数に比例する傾向が見られ、一方、1次

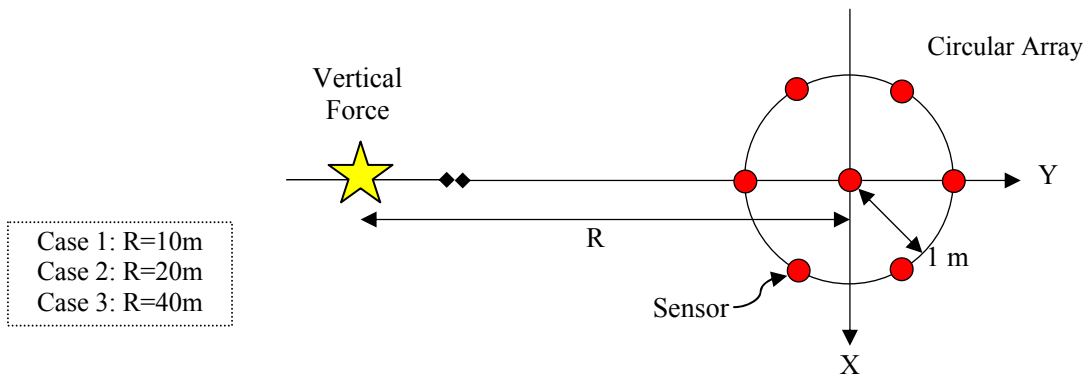


図5：砂袋落下地点と短周期微動の地震計の位置関係

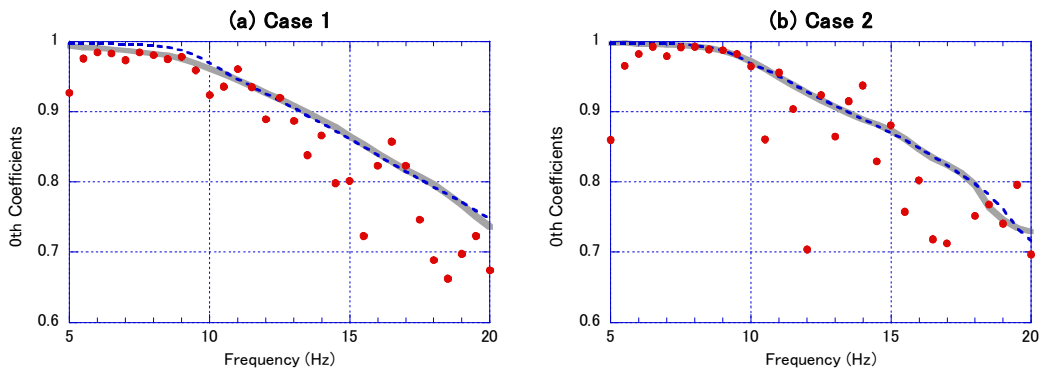


図6：コヒーレンスの円周方向フーリエ・スペクトルの0次係数（実部）， $real(P_0(f))$ [凡例は図7(a)参照]

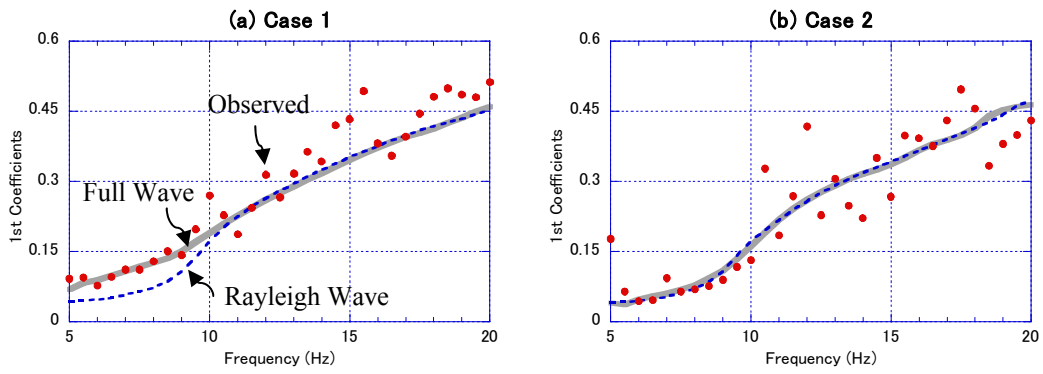


図7：コヒーレンスの円周方向フーリエ・スペクトルの1次係数（絶対値）， $|P_1(f)|$

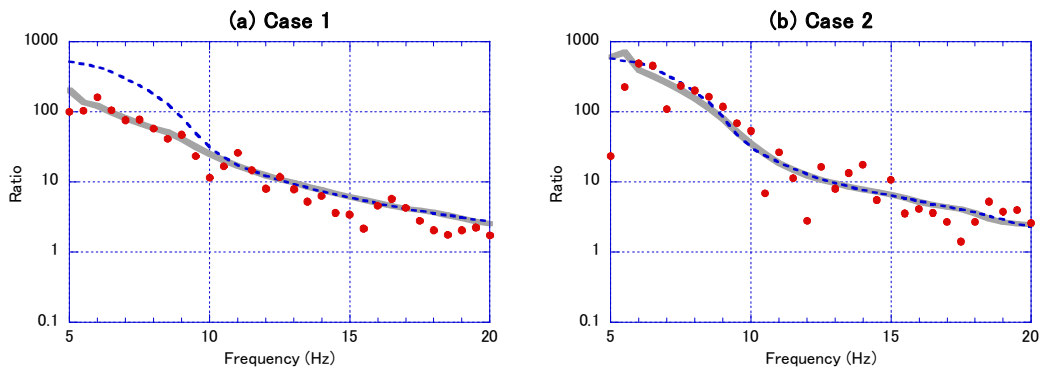


図8：コヒーレンスの円周方向フーリエ・スペクトルの0次係数（実部）の二乗値と1次係数（絶対値）二乗値の比， $Ratio$ [凡例は図7(a)参照]

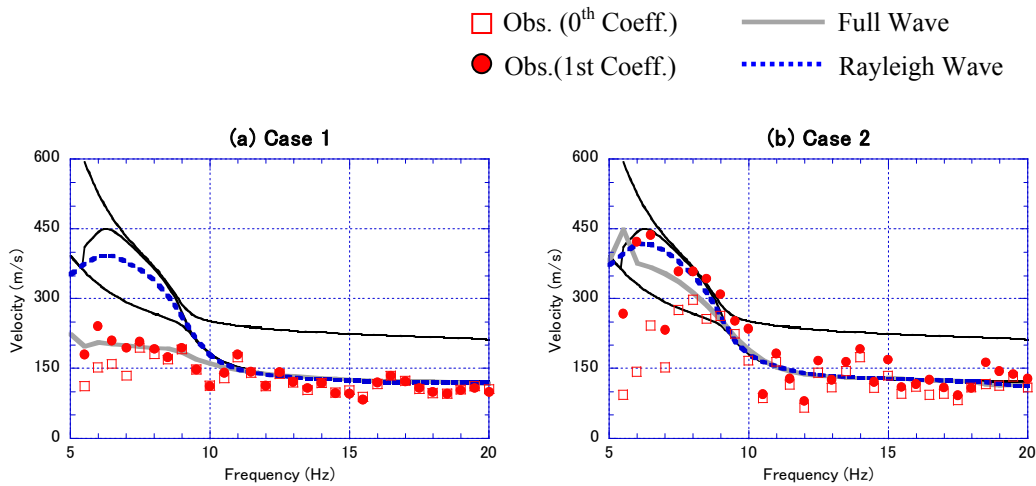


図9：位相速度の推定結果 [凡例以外の実線は図2(a)参照]

係数による位相速度は Case 1 では全波動場の結果に、Case 2 では Rayleigh 波の結果に良い対応を見せている。0 次係数は周波数が低くなるにつれて 1 に近づくため、 kr がほとんど一定となり、位相速度は周波数にほぼ比例する結果に陥りやすい。一方、1 次係数は周波数が低くなくても変化が継続するため、 kr が一定とはなりにくく、位相速度の決定精度が高いことがわかる。図面は省略するが、Cho et al.(2004)を参考にして、*Ratio* により算定される位相速度は 1 次係数を用いた結果とほぼ一致している。*Ratio* は 1 次係数と同様、低い周波数帯域でも変化を継続するため、位相速度の決定精度が高い。

5. 考察

実体波の影響と地下構造の推定に向けての留意点について、Case 1 の結果をもとに考察する。図 9(a)よりアレ観測記録の解析から得られる位相速度は全波動場による結果に一致しており、5~10Hz にかけて、Rayleigh 波の基本モードよりも明らかに小さい位相速度が求められている。5~8Hz にかけての位相速度は 200m/s 程度で、第 1 層 S 波速度が 130m/s、第 2 層のそれが 380m/s なので、両者の影響を受けた波動を抽出しているのかも知れない。分散性は見られるので、表面波を仮定して地下構造を推定してしまうと誤った結果に至るので注意がある。これを回避するためには、全波動場の Green 関数を用いた解析が有効と考えられるが、測定データには表層の浅い部分の構造のみが反映されている可能性もあるので、今後検討する予定である。

謝 辞

本研究では、久田嘉章氏（工学院大学）が開発した成層構造に対する Green 関数の解析コードを利用して頂

きました。また、測定とデータ処理において、菅原 誠氏（日本検査コンサルタント）のご協力を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Park, C. B., R. D. Miller, and J. Xia: Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, **64**, pp. 800-808, 1999.
- 2) 斎藤正徳：Lamb の問題に対する分岐線積分の寄与, *物理探査*, **46**, pp. 372-380, 1993.
- 3) 時松孝次, 田村修次：3 次元多層地盤における地表面鉛直点加振の応答変位に対するレイリー波と実体波の寄与, *日本建築学会構造系論文集*, No.476, pp.95-101, 1995 年.
- 4) Ohori, M., A. Nobata and K. Wakamatsu.: A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor arrays, *BSSA*, **92**, pp. 2323-2332, 2002.
- 5) Hisada, Y., 1995, An efficient method for computing green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths (Part 2), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**, 1080-1093.
- 6) Tokimatsu, K., S. Tamura, and H. Kojima: Effects of multiple modes on Rayleigh wave dispersion characteristics, *J. Geotech. Eng., ASCE*, **118**, pp. 1529-1543, 1992.
- 7) Aki, K. and P. G. Richards, 1980, *Quantitative seismology, theory and methods*, W. H. Freeman, San Francisco, 932 pp.
- 8) 岡田 広（研究代表者）：深度 3,000 メートル未満地下構造の広域概査のための微動探査法実用化への研究, 平成 5 年度科学研究費補助金 [試験研究(B)] 研究成果報告書 (研究課題番号 03554009), 1994 年 3 月.
- 9) Cho, I., T. Tada, and Y. Shinozaki: A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms, *Geophysics*, **69**, pp. 1535-1551, 2004.