地表面アレー測定による常時微動の波群特性の抽出

CHARACTERISTICS OF WAVE GROUP OF MICROTREMORS OBTAINED BY ARRAY MEASUREMENT

田村 保*, 永井大海**, 小久保 裕***, 住田裕志****
Tamotsu TAMURA, Ohmi NAGAI, Hiroshi KOKUBO and Hiroshi SUMITA

Microtremor measurement by ground surface array have been done at two reclaimed site located in Tokyo Bay area. Phase velocity and traveling direction of microtremors are determined from the frequency-wavenumber spectrum analysis. In the frequency range of surface ground natural period, existence of two wave group was found at both site. One wave group has the same dispersion characteristics of Love wave and the other is traveling with high phase velocity compared with the shear wave velocity of base layer. In the frequency-wavenumber spectrum, there is no evidence of existence of Rayleigh wave in this frequency range.

Keywords : *short-period microtremors, Rayleigh wave, Love wave, frequency-wave number spectrum, natural site period, reclaimed land*
短周期微動, レーリー波, ラブ波, 周波数-波数スペクトル, 地盤の固有周期, 埋立地

1. 序 論

微動を利用して表層地盤の地盤特性を推定する試みは金井ら¹⁾の研究を緒として、現在にいたるまで種々の新しい試みが増えられながら発展してきた。初期においては、周期1秒程度以下の短周期微動の利用に関してS波の重複反射が支配的であると考え、微動のスペクトル解析結果から求まる卓越周波数により地盤特性を推定する方法が多用されてきた。そのため、微動の測定は表面波を励起させるような顕著な振動源の影響の少ない深夜に実施することが多かった。しかし、短周期の微動の卓越振動数は、このような測定の際の多大な努力にもかかわらず、表層地盤の固有周期との対応は良くない場合も少なくなく、短周期微動の工学的有効性に関して疑問の声も少なくなかった。一方、周期1秒以上のやや長周期の微動に対しては、地表面アレーによる上下方向の微動の測定から波動の位相速度とその伝播方向を求める試み^{2)~5)}がなされており、微動の位相速度の分散特性の逆解析からやや深い地下構造を推定する手法として検討が進められている。地表面アレーによる測定では、常時微

動計を適切に配置することにより短周期の微動の周波数一波数スペクトルも求めることができ、短周期の上下方向の微動と地下構造の関係を検討した事例^{6)~15)}も近年多く見られる。特に、短周期の微動の地表面アレー測定では、表面波としてレイリー波の位相速度の分散特性を推定し表層地盤の速度構造と関係づけているために、従来のような深夜に微動の測定を実施する必要がなく、逆に表面波を励起する振動源の影響が優勢に認められる日中の測定が有利である。このように微動の表面波成分に着目した解析は非常に有効な手法としてほぼ確立されたものとなっている。

中村¹⁶⁾は表層地盤の一次固有周期近傍で微動はS波の重複反射で説明できる実体波の増幅が見られ、地表面での水平動と上下動のフーリエスペクトル振幅比をとることにより、表面波の影響を取り除いて安定的に表層地盤の増幅率が近似的に求まるとしている。地表面での水平動と上下動のフーリエスペクトル振幅比は、特に表層地盤の一次固有周期の近傍で非常に安定した値を示すことが多くの測定事例^{17)~19)}から示されており、中村¹⁶⁾の手

* 五洋建設技術研究所第二研究開発室

** 五洋建設技術研究所第二研究開発室

*** 五洋建設技術研究所第二研究開発室

**** 五洋建設技術研究所第二研究開発室

R&D Div., Research Institute of Technology, Penta-Ocean Construction Co. Ltd.

R&D Div., Research Institute of Technology, Penta-Ocean Construction Co. Ltd.

R&D Div., Research Institute of Technology, Penta-Ocean Construction Co. Ltd.

R&D Div., Research Institute of Technology, Penta-Ocean Construction Co. Ltd.

法の適用性が示されていると考えられる。しかしながら、表層地盤の一次固有周期の近傍における表面波の影響を上述の手法で除去しえるとする考え方の検証がないために、常時微動の主体を表面波であると考えたと議論が残る。例えば、時松ら¹³⁾は地表面アレー測定による上下方向の微動の測定結果から表面波の位相速度にはレイリー波の分散特性が見られることを示し、さらに地表面での水平動と上下動のフーリエスペクトル振幅比がレイリー波の水平動と上下動の振幅比の周期特性に良く対応することから、短周期微動にはレイリー波が含まれているとしている。しかし、時松ら¹³⁾が上下方向の微動からレイリー波のものと見られる分散特性を認めた周波数帯は、微動の水平動と上下動のフーリエスペクトル振幅比が最大となる表層地盤の一次固有周期近傍よりもより短周期側のみであり、レイリー波の水平動と上下動の振幅比の理論値と観測値の定性的な一致のみの議論となっている。そのため、中村¹⁶⁾の議論の反証とはなり得ない。

一般的に表面波は群速度が極小となる周波数近傍のエアリー相で卓越するといわれている²⁰⁾が、通常的地盤条件ではレイリー波のエアリー相はラブ波のエアリー相や地盤の一次固有周期に比べ高周波数側にある。これまでの短周期の微動を対象とした地表面アレーは、このレイリー波の卓越する周波数帯に着目したものがほとんどであり、ラブ波のエアリー相や地盤の一次固有周期近傍に対応する周波数帯の微動の位相速度の推定のためにはアレー規模が小さすぎる。また、すでに述べたやや長周期の微動を対象としたアレー規模では逆に大きすぎるため、この周波数帯を対象とした微動のアレー測定はちょうど既往の研究のはざまの周波数帯となっている。

そこで、本研究では、ラブ波のエアリー相や地盤の一次固有周期に対応する周波数帯の微動を対象とした比較的大規模な地表面アレーによる微動測定を行い、同周波数帯の微動の周波数-波数スペクトルの推定結果から微動の波群特性を検討した。対象とする波群は主として水平動が卓越するために、微動のアレー測定により水平動を主とした測定を実施した。検討対象地点は東京湾周辺埋立地の2地点^{19), 21)}であり、すでに小規模の地表面アレー測定(最大アレー長20m)によりレイリー波の分散特性を有する波群の存在を確認している。ただし、両地点でのレイリー波の卓越する周波数帯は表層地盤の一次固有周期に比べより短周期側となっている。

2. 微動のアレー測定の概要

微動測定は東京湾周辺の臨海部埋立地である市川市千鳥町(以下、市川と呼ぶ)と袖ヶ浦市奈良輪(以下、袖ヶ浦と呼ぶ)の2地点で行った。両地点ともに敷地面積が広く、目的とする比較的大規模の地表面アレーによる測定が可能な地点である。市川では敷地の北西に隣接して

JR 京葉線と首都高速湾岸線が並行して通っており、首都高速湾岸線は昼夜を問わず交通量が非常に多い。また、周辺は工場・倉庫が建ち並んだ工業地帯の一角に位置している。一方、袖ヶ浦も埋立地の工業用地の一角に位置しており、約2km隔てた北西方向に東電袖ヶ浦発電所と東京瓦斯袖ヶ浦工場があるが、隣接する地域は資材置場等の利用が主であり、明瞭な振動源となる工場等は見られない。また、周辺交通量は極めて少ない。

この両地点では、ボーリング調査およびPS検層を行い地盤構造を調べているが、両地点では1991年4月より地中と地表での地震観測を実施しており、小地震の観測記録から地盤構造の見直しを行っている。そこでの検討では、地震観測結果から得られている地中と地表の周波数伝達関数の観測値と理論上の周波数伝達関数の値がほぼ対応するように、地盤調査結果から推定された初期の地盤構造を修正している。このようにして求めた両地点の地盤速度構造を図-1, 2に示す。

測定に用いた微動計は、総合周波数特性が約5秒以下で平坦な応答特性をもっている。データは12bitのAD変換器を通して100Hzのサンプリングでパソコンに直接デジタル収録した。微動測定は地表面の8点に水平

図-1 地盤構造(市川)

図-2 地盤構造(袖ヶ浦)

図—3 微動計のアレー配置 (市川)

図—4 微動計のアレー配置 (袖ヶ浦)

動の微動計を配置して実施したが、両地点での対象とする周波数帯の予想される位相速度を考慮して、市川では図—3に示す2通りの規模の異なるアレー配置で、袖ヶ浦では図—4に示す2通りの規模の異なるアレー配置での測定を実施した。水平動を測定した8点のうちの4点では同時に上下動も測定した。両地点で微動計が若干不規則な配置となっているのは、敷地の利用条件等により微動計の設置が制限されたためである。それぞれのアレー配置に対して直交する水平2成分 (NS および EW 成分) の測定を数回実施した。測定は敷地内の作業が終了した午後5時より翌朝9時までの約1時間おきに、水平2成分にわたる測定をほぼ連続して実施した。

3. 微動の水平動と上下動のフーリエスペクトル

図—5～7は市川における微動のフーリエスペクトルを、水平動 (NS および EW 成分) と上下動について示したものであり、図—8～10は袖ヶ浦における微動のフーリエスペクトルを水平動と上下動について示したものである。フーリエスペクトルの計算にあたっては、約40秒間 (データ個数4096個) の記録を解析区間とし、スペクトルの平滑化にはハニングウィンドウを10回掛けている。両地点ともに1地点での記録のうちの8回の測定分を重ねて示している。

市川の水平動のフーリエスペクトルには、測定時間の違いによるスペクトル振幅の変動が見られるものの、1秒より短周期側に約1.3 Hz、約2 Hz および約3 Hz の3つの卓越する周波数成分が見られる。ただし約2 Hzの卓越振動成分のスペクトル振幅には水平2成分の間で差が見られ、NS成分はEW成分に比べそのピークは顕

図—5 水平動 (NS) のフーリエスペクトル (市川)

図—6 水平動 (EW) のフーリエスペクトル (市川)

図—7 上下動のフーリエスペクトル (市川)

図-8 水平動 (NS) のフーリエスペクトル (袖ヶ浦)

図-11 表層地盤の増幅率 (市川)

図-12 表面波の理論分散曲線 (市川)

図-9 水平動 (EW) のフーリエスペクトル (袖ヶ浦)

図-13 表層地盤の増幅率 (袖ヶ浦)

図-14 表面波の理論分散曲線 (袖ヶ浦)

図-10 上下動のフーリエスペクトル (袖ヶ浦)

著ではない。一方、上下動には水平動に対応した約 3 Hz の顕著な卓越周波数成分が見られるのみで、それより低周波数側の 1.3 Hz と約 2 Hz の卓越周波数成分は見られない。

袖ヶ浦の水平動のフーリエスペクトルにも測定時間の違いによるスペクトル振幅の変動が見られるものの、1 秒より短周期側の 2~4 Hz に水平動の卓越成分が認められる。ただしその卓越振動成分のスペクトル振幅には水平 2 成分の間に差が見られ、EW 成分は NS 成分に比べ振幅レベルが比較的低くなっている。一方、上下動には

これらの周波数帯に対応する明瞭な卓越周波数は見られない。

このようなフーリエスペクトルの卓越周波数成分は、図-1, 2 に示した両地点の表層地盤条件から推定される実体波と表面波の卓越周波数成分とよく対応している。図-11, 12 は市川の表層地盤の実体波の増幅率とラブ波の理論分散曲線およびレイリー波の理論分散曲線を示したものである。また、図-13, 14 は同じく袖ヶ浦の結果を示したものである。これらの結果から、市川での 1~2 Hz の水平動に見られる卓越振動成分は表層地盤の実体波の一次固有周期とラブ波のエアリー相に、約 3 Hz の波動はレイリー波のエアリー相に対応した波動成分と考えられる。また、袖ヶ浦における 2~4 Hz の水平動の卓越振動成分は表層地盤の実体波の一次固有周期とラブ波のエアリー相に対応していると考えられる。袖ヶ浦のレイリー波のエアリー相は 5 Hz より高周波数側に見られ、今回の測定では周波数-波数スペクトル解析が可能となる小規模のアレー配置による測定は実施していない。なお、両地点では別途実施した小規模の微動のアレー測定結果からレイリー波のエアリー相に対応した波動成分の存在を確認している²¹⁾。

4. 水平動と上下動のフーリエスペクトル振幅比

図一15, 16 は市川と袖ヶ浦の測定結果について、水平動と上下動のフーリエスペクトル振幅比を1地点の記録について重ねて示したものである。市川では1~2 Hz 付近で、袖ヶ浦においては2~4 Hz 付近で水平動と上下動のフーリエスペクトル振幅比は最大を示し、フーリエスペクトル振幅に比べ比較的安定した周期特性を示している。このような傾向は、両地点で別途実施した微動測定でも同様の結果が得られており¹⁹⁾、ほぼ安定的に両地点に現れる特徴と考えられる。序論でも述べたように中村¹⁶⁾と時松ら¹³⁾もこの定性的な結果については同じ結果を得ていながらその解釈が異なる。

そこで、微動の水平動と上下動のフーリエスペクトル

図一15 微動の水平動と上下動のフーリエスペクトル振幅比(市川)

図一16 微動の水平動と上下動のフーリエスペクトル振幅比(袖ヶ浦)

振幅比を、図一1, 2 に示した表層地盤から計算される実体波の増幅特性と、レイリー波の基本モードの水平動と上下動の振幅比をハスケルの理論²²⁾に基づいて求めたものの2つと比較した。比較にあたって微動の測定結果から得られるフーリエスペクトル振幅比は、複数回実施した各回のフーリエスペクトル比を各周波数ごとに単純平均し、得られた値を平均フーリエスペクトル比として表示した。その結果は図一17, 18 に示しているが、レイリー波の基本モードの水平動と上下動の振幅比が発散することを無視すれば、表層地盤の実体波の一次固有周期近傍においては、レイリー波の基本モードの水平動と上下動

図一17 表層地盤の増幅率とレイリー波の水平動と上下動の振幅比と微動の水平動と上下動のフーリエスペクトル振幅比の比較(市川)

図一18 表層地盤の増幅率とレイリー波の水平動と上下動の振幅比と微動の水平動と上下動のフーリエスペクトル振幅比の比較(袖ヶ浦)

の振幅比と表層地盤の実体波の増幅率はほぼ同様の周期特性を示すことがわかる。このような傾向は他地点でも見られるものであり、これらの結果を見る限りは中村¹⁶⁾と時松¹³⁾の主張は共に定性的には否定すべきものではないように思われる。時松¹³⁾は短周期微動の水平動および上下動のそれぞれの振幅が日変化しても、その比が一定となるのはレイリー波が卓越しているためであると結論づけているが、これは中村¹⁶⁾の仮定条件に立った場合もその比が一定となることは言えることであり、このことだけで微動にはレイリー波が卓越しているとするのは、根拠が不十分と言わざるを得ない。

5. 周波数-波数スペクトルの推定

ここでは、これまでの議論をふまえて、市川と袖ヶ浦で測定された微動の水平動のアレー測定結果に対して周波数-波数スペクトル解析を行い、微動の水平動に見られる波群の位相速度とその伝播方向を調べた。周波数-波数スペクトルの推定方法としては種々のものが提案されているが、ここでは分解能の優れたスペクトルが推定できることから多用されている Capon による最尤法 (MLM)²³⁾ を用いた。周波数-波数スペクトルの推定値が得られると、2次元波数空間上でスペクトルのピークに対応した波数ベクトルから、その波群の持つ位相速度とその伝播方向が推定できる。

市川での周波数-波数スペクトルの推定は1~2 Hzを中心とする周波数帯に対して実施した。すでにフーリエスペクトルの測定結果で示したように、同周波数帯ではNS成分に比べEW成分が卓越する傾向にあるため、周波数-波数スペクトル解析はEW成分に対して行った。図一19には4つの周波数に対する推定結果の例を示し

図一19 周波数-波数スペクトルの推定結果 (市川)

ている。図一20は2~4 Hzを中心とする周波数帯を対象として求めた袖ヶ浦の結果を示したものである。袖ヶ浦の場合も市川と同じくフーリエスペクトルの比較から、対象と考えた周波数帯において卓越する成分であるNS成分を用い、周波数-波数スペクトル解析を行っている。周波数-波数スペクトルの推定結果は、それぞれの周波数に対するスペクトル密度の最大値で正規化したコンターで表示している。

市川の周波数-波数スペクトルの推定結果によれば、これらの周波数帯では複数のスペクトルピークが見られ、複数の波群が伝播していることが認められる。袖ヶ浦の周波数-波数スペクトルの推定結果にも同様の傾向が認められ、対象とした周波数帯においては複数の波群が伝播していると考えられる。それぞれの波群の持つ位相速度およびその伝播方向については、周波数-波数スペクトルが最大値を示す波数ベクトルに対する値で代表させるものとしたが、複数の波群の伝播が確認されたものについては、それぞれのスペクトルピークに対する位相速度とその伝播方向も計算した。図一21, 22は市川と袖ヶ浦のそれぞれの地点について、ラブ波の理論分散曲線と周波数-波数スペクトルの推定値から求まる各波群の位相速度とを比較したものである。図中の●印が2番目以降のスペクトルピークの値を示したものである。

図一21によれば、市川ではラブ波の理論分散曲線に対応した位相速度を持つ波群と300~500 m/sの比較的速い位相速度をもつ波群の2つに大きく分けることができる、両波群は約1.3 Hz付近を境として、それより長周期側では300~500 m/sの位相速度を持つ波群が、1.3 Hzより短周期側ではラブ波に対応した位相速度を持つ波群が卓越していることがわかる。これらの結果から、

図一20 周波数-波数スペクトルの推定結果 (袖ヶ浦)

図-21 周波数-波数スペクトルより求めた位相速度とラブ波の理論分散曲線との比較 (市川)

図-23 波群伝播方向の推定結果 (市川)
x 軸正方向より反時計回りを正としている

図-22 周波数-波数スペクトルより求めた位相速度とラブ波の理論分散曲線との比較 (袖ヶ浦)

図-24 波群伝播方向の推定結果 (袖ヶ浦)

1~2 Hz の周波数帯ではラブ波の分散特性を有する波群が認められ、特に 1.3 Hz より高周波数側で卓越していると考えられる。また、地表面での位相速度が 300~500 m/s を有する波群も同周波数帯に認められるが、地盤調査で確認されている最深部の地層のせん断波速度である 300 m/s を超える値を示している。これらの波群は、せん断波速度がほぼ同程度の値を有するやや深い深度に存在する地層を伝播している波群が表層地盤へ実体波として伝播している波動か、より深い地下構造を反映した表面波として伝播している波動かのいずれかと考えることができる。しかし、市川においては図-1 に示した表層地盤より深い地下構造は現在のところ得られていないため、この結果だけからではそのいずれであるかを結論づけることはできない。

一方、図-22 の袖ヶ浦の結果にも市川と同様の傾向が認められ、2~4 Hz の周波数帯において、ラブ波の理論分散曲線に対応した波群と、それより速い 400~800 m/s の位相速度を持つ波群とに大きく分けることができる。ただし、ラブ波の理論分散曲線との対応は市川ほど

明確ではない。これらの結果は 2~4 Hz の周波数帯では、袖ヶ浦においても市川と同様の地盤震動環境にあることを示唆するものと考えられる。

このように市川と袖ヶ浦においては、ラブ波の分散特性を有する波群に加えて、市川では 300~500 m/s の値を、袖ヶ浦では 400~800 m/s の値を示す比較的速い速度で伝播する波群が観測されている。

図-23, 24 は両地点での各波群の伝播方向を示したものである。図中の●印は、両地点においてラブ波の分散性を持つと考えられる波群の伝播方向を、○印はラブ波の位相速度より速い位相速度を有する波群の伝播方向を示したものである。これによれば、市川ではラブ波と考えられる波群の伝播方向は各測定時間ともにほぼ-120度の方向（ほぼNからS方向に対応し、陸地側から海側に伝播していることになる）に集中しているのに対し、より速い位相速度を有する波群の伝播方向は各測定時間によるばらつきが大きい。市川ではラブ波と考えられる波群の伝播方向はNS方向に認められる結果となったが、NS方向に伝播するラブ波の地盤震動は進行方向に

直交する EW 方向が卓越すると考えられる。今回の測定では水平 2 方向の同時計測を実施していないため、パーティクルオービットによる地盤振動方向の確認はできないが、図—5, 6 に示した水平 2 成分のフーリエスペクトルの約 2 Hz 近傍のスペクトル振幅は EW 成分が卓越しており、この波群をラブ波と考えることを支持するものとする。一方、袖ヶ浦でもほぼ同様の結果を示しており、ラブ波の分散特性を有する波群はほぼ安定して -30 度の方向と 180 度の方向（ほぼ E 方向と NW 方向）に見られるのに対し、ラブ波の位相速度より速い位相速度を有する波群の伝播方向のばらつきは大きい。袖ヶ浦においても水平 2 成分の同時測定を実施していないが、ここで示したラブ波の分散特性を有する波群の伝播方向は、図—8, 9 に示したフーリエスペクトルの約 2~4 Hz 近傍のスペクトル振幅の水平 2 成分の差異と調和した結果となっている。これらの結果は、ラブ波の分散性を有する波群がラブ波として伝播していることを支持する結果の一つと考えられる。

今回の水平動を用いた測定結果からは、表層地盤の実体波の一次固有周期近傍において、微動にはレイリー波の分散特性を有する波群の存在は明確には認められず、ラブ波の分散特性を有する波群についてのみその存在が確認できた。前出の地表面における微動の水平動と上下動の振幅比に関する議論のうち、時松ら¹³⁾が示したようなレイリー波の卓越による水平動と上下動の振幅比に関する説明は、今回解析対象とした周波数帯においてはなりたない。一方、中村¹⁶⁾が示している基盤層を伝播する波動が表層へ実体波として伝播しているとする考え方について、その可能性を否定することは今回の測定結果ではできない。ただし、中村¹⁶⁾の考え方には基盤層における水平動と上下動の振幅レベル、すなわちスペクトル振幅がほぼ同じとする大きな仮定条件が必要であることや、水平動には今回の測定結果からも明らかになったような表面波として伝播する波動も含まれているなどの、手法の妥当性を検証するために残されている課題も少なくない。そのため、同手法は工学的近似手法、すなわち表層地盤の卓越周期を簡便かつかなりの精度で推定する手法として受け入れられるべきであろう。

6. 結 論

地盤構造があらかじめわかっている市川と袖ヶ浦において、表層地盤の S 波重複反射に基づく一次固有周波数近傍の周波数帯の微動を対象とした、微動の地表面アレー測定を実施し、同周波数近傍に認められる波群の特性に関して以下のような結論を得た。

1) 地表面における水平動と上下動のフーリエスペクトル振幅比は安定した周波数特性を示し、それらは表層地盤での S 波重複反射に基づく水平動の増幅率とレイリー

波の水平動と上下動の振幅比とに良く対応している。

2) 両地点の表面波の理論分散曲線から求まるエアリー相は、ラブ波の場合には表層地盤の S 波重複反射に基づく一次固有周期とほぼ近い値を示すが、レイリー波の場合にはそれより高周波数側に表れる。

3) 市川では表層地盤の S 波重複反射に基づく一次固有周波数近傍の周波数帯において、ラブ波の分散特性を有する波群と基盤のせん断波速度を超える位相速度を持つ波群の 2 つの波群が見られ、1.3 Hz を境として短周期側ではラブ波の分散性を有する波動が、長周期側では基盤のせん断波速度を超える速度で伝播する波動が卓越する傾向にある。

4) 袖ヶ浦においても表層地盤の S 波重複反射に基づく一次固有周波数近傍では、ラブ波の分散特性を有する波群と基盤のせん断波速度を超える位相速度を有する波群が見られる。

5) 周辺の振動源の特性によっては表面波の特性を有する波群も存在するが、表層地盤の一次固有周期近傍においてはレイリー波よりラブ波が卓越する傾向にある。

今回の測定結果により、適切なアレー長を設定すれば表層地盤の S 波重複反射に基づく一次固有周期近傍の周波数帯の微動の波群識別にも、微動の地表面アレー測定は有力であることがわかった。また、これらの結果から同周波数帯の微動の種別に関する若干の考察を加えた。ただし、一般的な微動の特性を議論するためには、対象とする個々の地点の詳細な現地測定に基づく解析結果を得ることが必要である。微動は地盤特性と振動源の特性を極めて忠実に再現するものであり、これらの特性を適切に評価することにより、微動を利用した地盤特性の検討の有効性が今後さらに高まるものと考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり宇都宮大学工学部入江助教授には貴重なご討議を頂きました。記して謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 金井 清：地震工学，共立出版，1972
- 2) 堀家正則：微動の位相速度および伝達関数の推定，地震第 2，第 33 巻，pp. 425~442，1980
- 3) 岡田 広，松島 健：長周期微動の観測による厚い地盤構造の推定について，第 7 回日本地震工学シンポジウム，pp. 211~215，1986
- 4) 岡田 広，松島 健，日高英治：長周期微動に含まれる表面波の位相速度推定法について—空間自己相関法と周波数一波数法の比較—，北海道大学地球物理学研究報告 No. 49，pp. 53~62，March 1987
- 5) 松島 健，小柳敏郎，岡田 広，森谷武男，笹谷 努，坂尻直己，宮腰 研：長周期微動を用いた十勝平野の深層地盤構造の推定（2），地震学会講演予稿集 1991 年度秋季大会，p. 281，1991，No. 2

- 6) T. Sato, H. Kawase, M. Matsui and S. Kataoka : Array Measurement of High Frequency Microtremors for Underground Structure Estimation, Fourth International Conference on Seismic Zonation, August 26-29, 1991
- 7) 佐藤俊明, 川瀬 博, 松井正宏, 片岡俊一 : アレー観測された短周期上下微動(周期約 0.2-0.5 秒)と地下構造(その 1)~(その 3), 日本建築学会大会(東北)梗概集 B, pp. 449~454, 1991
- 8) 片岡俊一, 松井正宏, 佐藤俊明, 川瀬 博 : 東京都江東区越中島でアレー観測された微動から地下構造を求める試み, 地震学会講演予稿集 1991 年度秋季大会, p. 147, 1991, No. 2
- 9) 松井正宏, 片岡俊一, 佐藤俊明 : 地盤の短周期常時微動に関する研究 人工震源実験および小アレー観測による上下成分の検討, 日本建築学会大会(北陸)梗概集 B, pp. 473~474, 1992
- 10) 微動アレー観測グループ : メキシコ市内における微動アレー観測による S 波速度構造の推定, 地震学会講演予稿集 1992 年度春期大会, p. 42, 1992, No. 1
- 11) 時松孝次, 新澤健一郎 : 短周期微動のアレー観測に基づく表層 S 波速度構造同定の可能性, 第 27 回土質工学研究発表会, pp. 963~964, 平成 4 年 6 月
- 12) 時松孝次, 酒井潤也, 仲條有二 : 短周期微動の水平鉛直振幅比と地盤構造の関係, 日本建築学会大会(北陸)梗概集 B, pp. 473~474, 1992
- 13) 時松孝次, 宮寺泰生 : 短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文報告集第 439 号, pp. 81~89, 1992 年 9 月
- 14) 翠川三郎 : チリ中央部の強震観測点の地盤特性, 地震学会講演予稿集 1992 年度春期大会, p. 48, 1992, No. 1
- 15) 田村 保, 永井大海 : 東京湾臨海部埋立地での常時微動測定(その 3), (その 4), 日本建築学会大会(北陸)梗概集 B, pp. 419~422, 1992
- 16) 中村 豊 : 常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定, 鉄道総研報告, pp. 18~27, 1988
- 17) 大町達夫, 年縄 巧, 茂木秀則 : 常時微動から推定した臨海埋立地盤の振動特性, 土木学会第 45 回年次学術講演会, pp. 1066~1067, 平成 2 年 9 月
- 18) 中村 豊, 滝沢太郎 : 常時微動による東京湾大井埠頭周辺地盤の地震動特性の推定, 第 8 回日本地震工学シンポジウム, pp. 679~684, 1990
- 19) 田村 保, 永井大海, 入江康隆 : 東京湾臨海部埋立地での常時微動測定, 土木学会第 46 回年次学術講演会講演梗概集 第 1 部, pp. 1272~1273, 1991
- 20) 嶋 悦三 : やさしい地震学入門, 鹿島出版会, 1990
- 21) 永井大海, 田村 保 : 東京湾臨海部埋立地での地震観測と常時微動測定, 土木学会第 47 回年次学術講演会講演梗概集 第 1 部, pp. 1272~1273, 1992
- 22) Haskell, N.A. : The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 43, No. 1, pp. 17~34, 1953
- 23) Capon, J. : High-resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis, Proc. IEEE 57, pp. 1408~1418, 1969

(1992 年 11 月 4 日原稿受理, 1993 年 4 月 6 日採用決定)