微動の研究について

大阪工業大学建築学科* 堀 家 正 則

Studies on Microtremors

Masanori HORIKE

Department of Architectural Engineering, Osaka Institute of Technology, Omiya 5-16-1,
Asahi-ku, Osaka-shi, Osaka-fu 535, Japan

(Received June 21, 1993; Accepted August 3, 1993)

Microtremors are extensively studied primarily in Japan to estimate conveniently seismic responses and subsurface structures of soil deposits. Methods using four quantities have been developed for this purpose; the predominant frequency, the spectral ratios between sites, the phase velocities of the surface waves, and the spectral ratios of Rayleigh waves between vertical and horizontal components. In this paper we first summarize studies of these methods and point out the problems inherent to them, and finally discuss under what conditions these techniques should be applied on the basis of the consideration of wave types contained in microtremors using elastic wave theory.

Key words: Microtremors, Predominant frequency, Spectral ratios between sites, Phase velocities of the surface waves, Spectral ratios of Rayleighwaves between vertical and horizontal components.

§1. はじめに

地震工学の目標の一つは精度の高い強震動予測である。強震動予測は、構造物の耐震設計や地震防災の基本的な資料となるため社会的な要請も大きい。現在、強震動波形を予測する手法は大別して三種類ある。一つは、小地震波形をグリーン関数とみなし、大地震の波形を予測する経験的グリーン関数法 [例えば, HARTZELL (1978), IRIKURA (1983)] である。もう一つは、統計的な手法により平均的な強震動を予測する方法 [BOORE (1983)] である。最後は、数値予測法である。数値予測は、LAMB (1904) によって始められ、現在も様々な手法の開発・改良が行われ [額・竹中 (1989)], 三次元不規則構造の予測計算も可能になりつつある [例えば, HORIKE *et al.* (1990)]. 経験的グリーン関数法は地下構造を知る必要はないが、小地震が必要であるためどこでも適用できない。一方、数値予測は地下構造が必要であるが、どこでも予測可能である。統計的な手法は、簡便であるが堆積盆地の様な不規則構造の効果は取り込みにくい。このように、これらの手法は、それぞれの長所・

所を持っているため、今後も平行して発展させていく必要があると思われる。

数値的な強震動予測では、震源と地震波伝播経路の地下構造を知っていなければならない。特に堆積盆地における予測では、1985 年のメキシコ地震や 1989 年のロマブリータ地震の被害からわかるように、その地下構造の地震動に及ぼす影響が極めて大きいため、堆積層の影響を取り込むことが不可欠である。このためには、堆積盆地の地下構造をかなり精度よく知っておく必要がある。しかし、堆積盆地の地下構造は複雑な三次元構造であるため、その構造を探索しモデル化するのは容易でない。更に、堆積平野は多くの場合人口密集度が高いため、探索そのものが困難である。

このような理由で、簡単に（地下構造を知らずに）地盤の地震応答を求める方法の必要性が生じる。その一つの方法は、地震観測を地盤上で行うことである。しかし、地震はめったに起こらないため、効率よく地盤の応答を推定することができない。これに対して、微動はいつでもどこでも存在するため、効率よく地盤応答を推定できる可能性がある。更に、ノイズの心配がないため（微動自身がノイズであるため）市街域でも利用可能である。

* 〒535 大阪市旭区大宮 5-16-1

微動は、この長所のため多くの欠点を持ちながら現在まで研究・利用されている。

微動の研究は、1950年代から1960年代初期にかけて盛んに行われた。これは耐震設計という工学的要求があったことと、IGY（国際地球観測年）があったためと思われる。そのため、研究は微動の卓越周期を中心にした地震工学的研究 [KANAI *et al.* (1954), KANAI and TANAKA (1961)] にとどまらず、弾性波としての本性 [AKAMATSU (1961), AKI (1957), 岡野健之助 (1959)] やその生成過程を明らかにする研究 [KISHINOUE and KOTAKA (1959), SANTO (1960)] も行われた。その後、DOUZE (1964) によるボーリング孔中での振幅分布を用いた研究や野越・五十嵐 (1970a, b) によるパワースペクトルと位相速度に基づく基礎的な研究も行われたが、1970年代に入るまでやや低迷した。

1970年代に入ると、構造物の長大化に伴い深い地盤構造の地震動への影響を考慮する必要から、1秒より長い長周期微動を中心にした研究が活発化していった [例えば、KUBOTERA and OTSUKA (1970), 坂尻・他 (1973)]。ただし、研究の内容は主に卓越周期に関するもので、金井等により1950年代に短周期に対して行われたものと異なっていない。更に、1980年代に入ると従来の卓越周期の研究の欠点を克服するため、アレイ観測に基づく研究が現れてきた。その一つが微動のスペクトル比を利用する研究 [例えば、IRIKURA and KAWANAKA (1980), KAGAMI *et al.* (1982)] であり、もう一つが位相速度からS波速度構造を推定する研究 [例えば、HORIKE (1985)] である。

微動研究は、その多くが日本の研究者により発展させられた。しかし、1985年のメキシコ地震や1989年のロマブリータ地震における表層地質（地盤構造）の地震動に対する影響の重要性が国際的に認知されて以降、微動研究は国内のみならず国際的にも増大している [例えば、FIELD *et al.* (1990), GUTIERREZ and SINGH (1992), HOUGH *et al.* (1992), LERMO *et al.* (1988)]。このように微動研究が増す一方で、地震工学や耐震工学の研究者の間に微動を用いて得られた結果に対する不信感がある様に思える [武村 (1990), 田守 (1992)]。この原因は微動が、地震波のように時間軸上でP波、S波、表面波と分離せず複雑に混在し、かつ微動源でのスペクトルが不明であるにもかかわらず、余りに単純化した微動モデルに基づき解析と解釈をしてきたためと考えられる。そこで、本論文ではまず現在の微動の主な利用形態である、(1) 卓越周期、(2) 異なる二地点間のスペクトル比、(3) 表面波の位相速度、(4) レーリー波の上下動と水平動間のスペクトル比の研究の概説とそれらの問題点に言及す

る。最後に弾性波動論の観点から、これらの手法をどのような条件下で利用すれば信頼性の高い結果を得られるかを考察する。

§2. 卓越周期

短周期微動を用いて簡便に地盤の震動特性を推定する研究は、金井を中心に1950年代から1960年代初期にかけて精力的に行われ、卓越周期を用いて地盤種類を分類する研究にまとめられた [KANAI and TANAKA (1961)]。この手法は観測と解析が極めて簡便であるため現在もよく利用されているが、多くの問題も含んでいる。この方法では、地盤へ入射する微動は振幅スペクトルが一定のS波の垂直入射を仮定することにより、卓越周期と地下構造が関係づけられる [KANAI (1957), KANAI *et al.* (1965)]。しかし、S波の垂直入射の仮定は、短周期微動源が主に地表にあることを考慮すると、適切な仮定とは思えない。このことに関する詳細な議論は、最後の節で行う。また、入射振幅スペクトル一定の仮定も現実的とは思えない。実際、UDIWIADIA and TRIFUNAC (1973) は、カリフォルニア州エルセントロにおける微動観測結果から、卓越周期は地盤構造よりも微動源や伝播経路の影響を強く受けていることを主張した。また、IRIKURA and KAWANAKA (1980) は、地下構造が変化する所で微動のアレイ観測を行い、卓越周期の変化ではなく振幅スペクトルの変化が地下構造に関係づけられることを示した。

構造物の長大化に伴い、より深い地盤構造の影響を取り込むため、1970年代に入り長周期微動の研究が活発化した。研究の初期は、短周期微動の場合と同様、卓越周期と深い地盤構造の関係が議論された [KUBOTERA and OTSUKA (1970), OHTA *et al.* (1978), 坂尻・他 (1973)]。しかし、KAGAMI *et al.* (1982) は、ロサンゼルスと新潟ける長周期微動の観測結果から、卓越周期の変化でなく振幅スペクトルの変化が深い地盤構造の変化と対応する場合があることを示した。

以上で述べたように、長・短周期の微動の卓越周期が必ずしも地下構造と対応しない場合があることが明らかになり、スペクトル比の利用が考えられ始めた。

§3. 異なる二地点間のスペクトル比

微動と地盤の卓越周期が対応しない場合があるのは、微動の振幅スペクトルは、地盤の影響のみでなく微動源のスペクトルと伝播経路の影響も受けているためである。従って、地盤構造の影響のみを推定しようとするれば、微動源のスペクトルと伝播経路の影響を微動の振幅スペクトルから取り除く必要がある。そこで、ある基準観測

点の振幅スペクトルに対する残りの観測点のスペクトルの比を求めることにより、微動源と伝播経路の影響を取り除くことが試みられた。

IRIKURA and KAWANAKA (1980) は、断層を横切る直線アレイにより測定した短周期微動のスペクトル比の変化が、地下構造の変化に対応していることを見いだした。この方法は、この後堆積層に覆われた断層を探索する目的でしばしば用いられた [例えば、古川・他 (1984)、今住・小林 (1985)、Tsutsui and Kobayashi (1989)]。また、長周期微動のスペクトル比と深い地盤構造の関係も研究され、その対応関係が良い場合があることが示された [例えば、AKAMATSU *et al.* (1992)、KAGAMI *et al.* (1986)、佐間野・山崎 (1986)]。

一方、瀬尾・佐間野 (1993) は微動のスペクトル比と地震動のスペクトル比の比較を行った結果、岩盤と地盤間のスペクトル比は地震と微動で対応が悪いが、地盤間では地震と微動ではそれほど悪くないことを示した。このことは、スペクトル比を推定する二点に入力するスペクトルの空間的共通性が保証されているのか、さらに微動のスペクトル比は地震動と同じ弾性波のスペクトル比なのか (あるいは、微動のスペクトル比は地震動のそれとどの程度対応するのか) の問題があることを示唆している。これらの問題についても、最後の節で議論する。微動のスペクトル比は、微動源や伝播経路のスペクトルの影響を除去したという点では、卓越周期を利用することより優れていると考えられるが、上述した未解決の問題も含んでいる。

§4. 表面波の位相速度

前節で述べたように、卓越周期や振幅スペクトル比を利用すると、微動の入力に関する不確かさを避けることができない。そこで、微動の入力でなく地下構造のみに依存する量を微動から推定し、それらを用いて地下構造を推定することが試みられ始めた [堀家 (1980)]。このような量として、表面波の位相速度やレーリー波の水平動と上下動間の振幅スペクトル比がある [HASKELL (1953)]。この節では位相速度の研究について述べる。水平動と上下動間の振幅スペクトルの研究については、次節で述べる。

微動の位相速度を推定する試みも、卓越周期の研究とほぼ同じところから始められた。但し、その目的は地下構造を推定することではなく、位相速度から微動が主に表面波であるか実体波であるかを明らかにすることであった。この種の最初の研究は、AKI (1957) によって行われた。彼は、微動を空間的にも時間的にも定常であると仮定し、水平動と上下動の位相速度を求めた。さらに、そ

の位相速度から微動に表面波が含まれていることを示した。また、AKAMATSU (1961) や野越・五十嵐 (1970a) も三点アレイ観測により取得した微動を解析し、その位相速度から微動に表面波が含まれていることを示した。長周期領域では、岡野 (1959) により三点アレイを用いた位相速度の推定が行われた。推定された位相速度はバラツキが大きく、弾性波の種類の同定は困難であった。工藤・他 (1976) は、アレイ観測された長周期微動から明瞭な分散性を示し、かつその値も明らかに表面波である位相速度を推定した。これらの微動の位相速度推定の研究から、微動には表面波が含まれており、その位相速度を推定すれば地下構造探索に使える可能性が認識された。このことを明瞭に意識して、微動から推定した表面波の位相速度による地下構造探索の可能性を調べる研究は、Toksöz (1964) により行われた。

以上の微動の位相速度を推定する研究や地下構造探索の研究を背景に、HORIKE (1985) は、より正確な表面波の位相速度推定法と系統的な地下構造決定法を合わせた微動による地下構造探索法を提案し、それを用いて地下構造が推定できることを実証した。具体的には、アレイ観測した微動記録の周波数-波数解析 (f - k 解析) [CAPON (1969)] により推定したレーリー波の位相速度のインバージョンにより地下構造 (実際には、S 波速度構造) を決定する。岡田・松島 (1990) と MATSUSHIMA and OKADA (1990) は、精力的に北海道各地でこの手法を用いて基盤岩までの S 波速度構造を推定し、地下構造探索法としての定着を図った。現在この手法は、多くの研究者により利用され [例えば、青木・他 (1990)、香川・他 (1993)、松井・他 (1991)、永井・田村 (1992)、時松・宮寺 (1992)]、地下構造探索法としてほぼ定着したものと考えられる。

この手法の特徴は、以下の三点である。第一点目は、微動は一般に表面波と実体波が混在しているが、 f - k 解析により表面波と実体波を分離するので、表面波の位相速度を正確に推定できる。第二点目は、表面波の位相速度はおもに S 波速度構造により制御されているため、長周期微動を用いることにより、従来の弾性波探索では不可能であった深度数百 m までの S 波速度が、簡便に推定できるようになったことである。第三点目は、弾性波探索の困難な都市域でも利用できることである。

この手法も当然問題点を持っている。最大の問題は、S 波速度構造推定のインバージョンが水平成層構造の地下構造モデルに基づいていることである。しかし、実際には f - k スペクトル解析の結果が、互いに逆方向から進行してくる異なった速度のレーリー波の存在を示したり、平行成層構造では合理的な S 波速度構造が求まらな

い場合がある[荒川・他(1993)].このような例は、不規則地下構造モデルによるインバージョンの必要性を示している。特に、堆積盆地の不規則構造の地震動への寄与が大きいことを考慮すると、不規則構造を推定する探査法として発展させることは重要である。もう一つの問題は、ラブ波の位相速度が利用されていないことである。堀家(1981)や岡田・松島(1989)によりラブ波の位相速度を微動の水平成分から推定する試みはあるが、レーリー波のように安定して地下構造推定に利用できるまでに至っていない。これは、上下動に比べて水平動の波群構成が複雑であるため、ラブ波のみを抽出することが困難であるためと思われる。しかし、ラブ波はP波速度構造にまったく影響を受けないので、レーリー波を用いるより精度良くS波速度構造を推定できる可能性がある。微動の水平成分からラブ波のみを抽出するデータ解析手法を確立する必要があると考えられる。また、観測にはアレイを展開し時刻を合わせる必要があるため、卓越周期や振幅スペクトル比の推定のための観測に比較して、やや骨折りである。しかし、最近の電子機器の発達により、この問題も解決しつつあると思われる。

§5. レーリー波の水平動と上下動間の振幅スペクトル比

レーリー波の水平動と上下動の振幅スペクトル比も、その位相速度同様地下構造のみに依存する。従って、微動に含まれるレーリー波の上下動と水平動成分を抽出できれば、地下構造探査に利用できる。塩野・他(1979)は長周期微動に対して、レーリー波の水平動に対する上下動のスペクトル比を推定し、それが地下構造から計算される基本モードのそれによく対応していることを示した。また、短周期微動に対しても同様の結果が得られている[堀家(1980); 時松・宮寺(1992)].

しかし、これらの研究で得られたスペクトル比は地下構造から予測されるスペクトル比と定性的に一致する程度で、地下構造探査法として確立するまでには至っていない。この原因は、微動の上下動及び水平動からレーリー波(特に、レーリー波の水平成分の振幅)のみを抽出するデータ解析手法が存在しないためと、その振幅比が理論的には、0〜 ∞ まで変化するためと考えられる。微動からラブ波を抽出する問題とあわせて考えると、様々な弾性波が混在している微動のような複雑な波動から、個々の弾性波を抽出するデータ解析手法の開発が必要である。

§6. 弾性波動論に基づく考察

以上で述べたように、これまでの微動の利用形態とし

て、大別して四手法がこれまで提案された。これらの手法を利用して信頼性の高い結果を得るためには、少なくとも微動がどのような種類の弾性波で構成されているかを理解しておく必要がある。そこで、まず弾性波動論の立場から微動の弾性波の構成を考察する。次に、その結果を利用して、これらの手法をどのような条件を満たすサイトで利用すれば信頼性の高い結果を得られるかについて考える。

一秒程度より短い周期成分は、週末に微動レベルが低下すること[山中・他(1991)]と、昼間の微動レベルが夜間より高いこと[片岡(1993)]から、主に交通等の人間活動により生じると考えられる。このことは、短周期微動源は堆積盆地内の地表震源であることを意味する。一方、これより長周期成分は波浪[SANTO(1960), 鏡味・他(1983)]や低気圧[LACOSS *et al.* (1969)]により生成される。従って、長周期微動源は堆積盆地の外にあると考えられる。このように、微動源が異なっている。以下では短周期微動と長周期微動に分けて考察する。但し、海岸平野に寄せる波が微動源になる場合は、海岸平野の長周期微動源は平野内の地表震源であるので短周期微動の場合と同じ結果になる。

短周期の微動源が地表にあることは、それが効率よく表面波を放射することを意味する。なぜなら、表面波放射の深さ依存性は、モードの深さ方向の振幅分布に比例し、その振幅分布は地表付近で最大になるためである。また、微動源が堆積盆地内にあることは、観測点に対して比較的近くにあるため、幾何学的波面の拡がりによる見かけの減衰の効果が小さい表面波が、実体波より卓越することを意味する。以上の理由から、短周期微動は表面波が実体波より優勢に含まれていると考えられる。

この様に短周期微動は表面波が優越することを考慮すると、卓越周期の解釈に用いられる実体S波の垂直入射の仮定は、適切な微動モデルではない。しかし、ALLAM and SHIMA(1967)は、比較的インピーダンス比の大きい地層構成をしている地盤の卓越周期はSH波とラブ波の卓越周期はほぼ一致するとして、卓越周期の利用では微動の弾性波の種類の議論は重要でないことを主張した。確かに、インピーダンス比の大きい地盤では卓越周期は一致するが、微動測定がなされるのはそのような地盤構成の場所のみでない。また、この議論の暗黙の前提である微動の水平成分がSH波とラブ波のみと仮定することも、レーリー波、P波、SV波の水平成分への寄与を無視しており問題があると思われる。実際、堀家(1981)は短周期微動の水平成分のf-k解析を行い、必ずしもトランスバース成分が卓越しないことを示した。

長周期微動は堆積盆地の外の微動源により主に生じ

る。これらの微動源から射出された弾性波は、表面波や実体波あるいはそれらの混合したものとして堆積盆地に入射するので、長周期の微動に関する議論は実体波入射の場合と表面波入射の場合に分けて考える。BARD and BOUCHON (1985) は、実体波が堆積盆地に入射する場合、厚さに対して幅の広い堆積盆地内では表面波と実体波に分かれて現れ、狭い堆積盆地では共振現象が現れることを示した。実在する堆積盆地はほとんど幅の広いものである。微動が実体波として入射すると堆積盆地内では実体波と表面波に分かれる。また、微動が表面波として入射する場合には、KUDO (1978) や YAMANAKA (1989) の表面波が堆積盆地に入射した場合の研究からわかるように、その多くが再び表面波として現れる。また、海に面した平野の場合、海岸に打ち寄せる波が微動源になる場合には、平野内の地表震源と考えられるので、短周期微動の場合と同じ理由で、表面波が長周期微動中に卓越する考えられる。以上の考察から、長周期微動も微動源の条件にかかわらず、かなりの表面波を含んでいると考えられる。

これまでの考察では、地盤媒質の影響を考慮しなかったが、実際には地盤媒質は柔らかく、基盤岩とのインピーダンス比も大きいことを暗黙に仮定していた。そこで、地盤が硬くなる ($P \cdot S$ 波速度が大きくなる) と微動の弾性波構成にどのような影響を及ぼすかを考える。地盤が硬くなると、地表震源が放射する表面波は減少する。なぜなら、一般に位相速度、群速度が大きくなり、更にエネルギー積分も大きくなるため、放射される表面波の振幅は小さくなる (AKI and RICHARDS (1980) の式 7.142 と式 7.143 を見よ)。また、堆積盆地外から微動が実体波として入射する場合は、表面波への変換効率は悪くなる [BARD and BOUCHON (1980a, b)]。したがって、地盤が硬くなると微動に含まれる表面波成分が、柔らかい地盤に比べて、相対的に減少すると考えられる。以上の考察をまとめると、地表微動源が多い (強い) ほど、また地盤が柔らかいかあるいは地盤と岩盤のインピーダンス比が大きいほど、微動に含まれる表面波の割合は増加すると考えられる。

以上の微動の弾性波の構成の考察に基づき、表面波の位相速度やレーリー波の水平動と上下動間のスペクトル比による地下構造推定法を、どのような条件の堆積盆地で適用すればよいかを考える。これらの手法を利用するためには、微動中にかなりの表面波が含まれていることが必要である。既に述べたように、人間活動の盛んな柔らかい堆積盆地では、長・短周期微動には表面波がかなり含まれていると考えられるので、このような場所ではうまく利用できると思われる。但し、ラブ波の位相速度

やレーリー波の水平動と上下動間のスペクトル比を利用するためには、水平動成分の微動からこれらの波動成分を分離・抽出するデータ解析法が前提になる。おそらく、日本のほとんどの堆積盆地は人間活動が盛んで柔らかい堆積盆地と思われるので、これらの手法の適用が可能である。特に、微動の上下動成分のアレイ観測によりレーリー波の位相速度を推定し、更にそれから S 波速度構造を推定する手法は、既に探査法として確立しており、日本のほとんどの堆積盆地で、即応用可能である。

それでは、これらの手法が適用できない場所はどこであろうか。当然、微動に含まれる表面波の割合が少ない所である。このような可能性が高い場所は、人間活動のほとんどない硬い地盤である。具体的に言えば、ESG 研究の国際テストフィールドとなったカリフォルニア州のターキーフラットや富士山麓等であろう。これらの場所では、人間活動が低いため地表震源の短周期微動源はないので、短周期微動も遠くの微動源であろう。更に、遠方の微動源を発生した表面波は障害物の多い地表で散乱するため、表面波入射を考えるのは無理がある。従って、このような条件の場所では実体波入射の可能性が高い。実体波が硬い地盤に入射すると表面波への変換効率が悪いので、短周期微動は実体波が優勢になる可能性が高い。また、長周期微動も実体波入射の場合には表面波への変換効率が悪い。以上の理由から、人間活動の低い硬い地盤では、微動の長・短周期微動に含まれる表面波の割合は、かなり少ないと思われる。したがって、このような条件の堆積盆地では、表面波の位相速度やレーリー波の水平動と上下動のスペクトル比を推定するのは困難になると考えられる。むしろ、このような所では、微動の水平成分は S 波の垂直入射が適切なモデルになる場合もありうると考えられる [KATZ (1976)]。但し、微動の入射スペクトル振幅が一定の仮定は必ずしも満たされていないかもしれない。

次に、二点間のスペクトル比を利用する場合の条件について考える。この手法により得られた結果が意味を持つためには、少なくともスペクトル比を推定する二点に入力する微動が共通であることが必要である。どの位の範囲で入力共通とみなせるかは、微動源の分布に依存しているため、一般的な結論を言うことは困難である。しかし、概して言えば、微動源が堆積盆地外にある時は広い範囲で入力の共通性が保証されるが、盆地内にある場合は狭い範囲でしか保証されない。従って、交通の激しい堆積盆地で微動のスペクトル比を利用する場合は、かなり限定された範囲内にすべきである。一方、人間活動の低い堆積盆地の短周期微動や長周期微動の場合は、微動源は堆積盆地の外にあるので広い範囲で入力共通と考

えられる。

鏡味 (1993) は、岩盤に対する地盤の長周期のスペクトル比が地震記録のそれでは考えられない値 (数十～百倍以上) になることを報告している。このことは、微動のスペクトル比を即地震のスペクトル比としてはいけない場合があることを示している。この問題は重要であるが、長周期微動の岩盤観測点をどこにすべきかや、微動と地震動の弾性波としての構成の違い等を議論する必要があるので、別の機会に譲りたい。

最後に、中村 (1988) により提案された手法についてコメントする。この方法を用いると、簡単に S 波の伝達関数を推定できるらしく、微動の利用法として注目を浴びているようである。この方法では、基盤 (S 波速度 400 m/s 程度以上の工学的基盤) と地表間の S 波の伝達関数は、地表で観測された微動の上下動成分に対する水平動成分の比から求められるとしている。このことの説明として中村が述べていることは、納得できないことが多い。例えば、基盤では上下動と水平動の微動振幅はほぼ同じで、上下動は P 波として、水平動は S 波として地盤を伝播するとしている。説明自体には多くの疑問を感じるが、解析結果はこの手法の妥当性を示す場合があるらしい。観測結果が事実であれば、合理的な説明が必要になるので、この手法の結果が正しいか否かを検証することが、今最も重要であると考える。

微動の長所は、いつでもどこでも比較的簡単に測定できることである。特に市街地では、経済性や安全性をも考慮すると、微動以外の手法の適用は困難である。このため、今後も微動を利用して地盤の地震応答や地下構造を推定することは、ますます増えていくと思われる。従って、新たな微動の利用法や解析手法の研究と同時に、より信頼性の高い結果を得るために、それぞれの手法の適用条件を明らかにする研究も重要である。

謝 辞

北海道大学の岡田 広教授と鏡味洋史教授からのコメントは論文の改善に大きく寄与しました。

文 献

- AKAMATSU, J., M. FUJITA and K. NISHIMURA, 1992, Vibrational characteristics of microseisms and their applicability to microzoning in a sedimentary basin, *J. Phys. Earth*, **40**, 137-150.
- AKAMATSU, K., 1961, On microseisms in frequency range from 1 c/s to 200 c/s, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **39**, 23-75.
- AKI, K., 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to micro-tremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **35**, 415-456.
- AKI, K. and P. G. RICHARDS, 1980, *Quantitative seismology; Theory and method*, W. H. Freeman and Company, 1, 314.
- ALLAM A. and E. SHIMA, 1967, An investigation into the nature of microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **45**, 43-59.
- 青木義彦・堀家正則・竹内吉弘, 1990, 大阪平野における P-S 速度構造推定, 第 8 回日本地震工学シンポジウム論文集, **1**, 691-696.
- 荒川真治・堀家正則・竹内吉宏・上林宏敏, 1993, 微動の位相速度を用いた不規則構造における S 波速度構造推定の可能性, 地球惑星科学関連学会 1993 年合同大会予行集, 210.
- BARD P.-Y. and M. BOUCHON, 1980a, The seismic response of sediment-filled valleys. Part 1. The case of incident SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **70**, 1263-1286.
- BARD P.-Y. and M. BOUCHON, 1980b, The seismic response of sediment-filled valleys. Part 2. The case of incident P and SV waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **70**, 1921-1941.
- BARD P.-Y. and M. BOUCHON, 1985, The two dimensional resonance of sediment-filled valleys, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 519-541.
- BOORE, D. M., 1983, Stochastic simulation of high frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1865-1894.
- CAPON, J., 1969, High-resolution frequency wavenumber spectrum analysis, *Proc. IEEE*, **57**, 1408-1418.
- DOUZ, E. J., 1964, Signal and noise in deep wells, *Geophysics*, **24**, 721-732.
- FIELD, E. H., S. E. HOUGH and K. H. JACOB, 1990, Using microtremors to assess potential site response: A case study in Flusing Meadow, New York City, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**, 1456-1480.
- 古川信夫・春日茂・竹内文朗・天池文男, 1984, やや長周期微動の群列観測による福井地震断層探査, *地震* **2**, **37**, 207-212.
- GUTIERREZ, C. and S. K. SINGH, 1992, A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: Comparison of results from strong-motion and microtremor data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 642-659.
- HARTZELL S. H., 1978, Earthquake aftershocks as Green's function, *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 1-4.
- HASKELL, N. A., 1953, The dispersion of surface waves in multilayered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **43**, 17-34.
- 堀家正則, 1980, 微動の位相速度及び伝達関数の推定, *地震* **2**, **33**, 425-442.
- 堀家正則, 1981, 微動の位相速度の推定, *地震* **2**, **34**, 535-550.
- HORIKE M., 1985, Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized

- areas, *J. Phys. Earth*, **33**, 59-96.
- HORIKE, M., H. UEBAYASHI and Y. TAKEUCHI, 1990, Seismic response in three dimensional sedimentary basin due to plane S wave incidence, *J. Phys. Earth*, **38**, 261-284.
- HOUGH, E. H., L. SEEGER, A. RORVELLI, L. MALAGUNINI, A. DECESARE, G. SELVEGGI and A. LERNER-LAM, 1992, Ambient noise and weak-motion excitation of sediment resonance: Results from the timber valley, Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1186-1205.
- 今住 隆・小林芳正, 1985, 微動観測と浅層反射法による京都盆地西南部・金ヶ原構造線の探査, *物理探鉱*, **38**, 155-162.
- IRIKURA, K. and T. KAWANAKA, 1980, Characteristics of microtremors on ground with discontinuous underground structure, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **30**, 81-96.
- IRIKURA, K., 1983, Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **33**, 63-104.
- KAGAMI, H., C. M. DUKE, G. C. LIANG and Y. OHTA, 1982, Observation of 1- to 5-second microtremors and their application to earthquake engineering. Part II. Evaluation of site effect upon seismic wave amplification due to extremely deep soil deposits, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, 987-998.
- 鏡味洋史・堀田 淳・太田 裕・坂尻直巳・吉田厚司・田中愛一郎・久保寺章, 1983, やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (8)一波浪との同時比較観測一, *地震 2*, **36**, 609-618.
- 鏡味洋史, 1993, 長周期微動の工学的利用—岩盤サイトに対する振幅比によるゾーニング—, 文部省科学研究費総合研究 (A) 研究成果報告集, 地震動に与える表層地質の影響に関する総合的研究, 165-170.
- 香川敬生・澤田純男・岩崎好規・南莊 淳, 常時微動アレー観測から見た大阪平野の深部地盤構造, 1993, 地球惑星科学関連学会 1993 年合同大会予稿集, **210**.
- KANAI, K., T. OSADA and T. TANAKA, 1954, An investigation into the nature of microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **32**, 199-209.
- KANAI, K., 1957, The requisite condition for the predominant vibration of ground, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **35**, 457-471.
- KANAI, K. and T. TANAKA, 1961, On microtremors VIII, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **39**, 97-114.
- KANAI, K., T. TANAKA and S. YOSHIZAWA, 1965, On microtremors IX, (multiple reflection problem), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **43**, 577-588.
- KATZ, L. J., 1976, Microtremor analysis of local geological conditions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **66**, 45-60.
- 額縁一起・竹中博士, 1989, 近地地震波の伝播に関する理論, *地震 2*, **41**, 391-403.
- 片岡俊一, 1993, 久野農協地区における短周期微動の特性について, 文部省科研費総合研究 (A) 研究成果報告集, 地震動に与える表層地質の影響に関する総合的研究, 16-23.
- KISHINOUE, F. and M. KOTAKA, 1959, Microseisms and typhoons, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **37**, 171-176.
- KUBOTERA, A. and M. OTSUKA, 1970, Nature of non-volcanic microtremor observed on the Aso-Calders, *J. Phys. Earth*, **18**, 115-124.
- KUDO, K., 1978, The contribution of Love waves to strong ground motions, *Proceedings of the Second International Conference on Microzonation for Safer Construction*, 765-776.
- 工藤一嘉・太田 裕・後藤典俊・鏡味洋史・塩野計司・坂尻直巳・成瀬聖慈・出原孝示・竹内文朗, 1976, やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (4)—Array 観測による微動伝播性の検討一, *地震 2*, **29**, 323-337.
- LACOSS, R. T., E. J. KELLY and N. M. TOKSÖZ 1969, Estimation of seismic noise structure using arrays, *Geophysics*, **34**, 21-38.
- LAMB, E. H., 1904, On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **A203**, 1-42.
- LERMO, J., M. RODRIGUEZ and S. K. SINGH, 1988, Natural period of sites in valley of Mexico from microtremor measurements and strong motion data, *Earthquake Spectra*, **4**, 805-814.
- 松井正宏・片岡俊一・佐藤俊明・川瀬 博, 1991, 東京都江東越中島でアレー観測された短周期微動上下成分の諸特性と地下構造, 1991 年度秋季大会地震学会講演予稿集, No. 2, 283.
- MATSUSHIMA, T. and H. OKADA, 1990, Determination of deep geological structure under urban areas, *Butsuri-Tansa*, **43**, 21-33.
- 永井大海・田村 保, 1992, 東京湾臨海部埋め立て地での常時微動測定, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, **41**, 9-420.
- 中村 豊, 1988, 常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定, *鉄道研究報告*, **4**, 18-27.
- 野越三雄・五十嵐 亨, 1970a, 微動の伝播性, *地震 2*, **23**, 269-280.
- 野越三雄・五十嵐 亨, 1970b, 微動の振幅特性, *地震 2*, **23**, 281-303.
- 岡田 広・松島 健・森谷武男・笹谷 努, 1990, 広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法, *物理探査*, **43**, 402-417.
- 岡田 広・松島 健, 1989, 微動探査法 (1)—微動に含まれるラブ波の識別方法とその理論—物理探査学会第 81 回学術講演会講演論文集, 15-18.
- 岡野健之助, 1959, 阿武山地震観測所において観測された脈動について, *地震 2*, **12**, 183-190.
- OHTA, Y., H. KAGAMI, N. GOTO and K. KUDO, 1978, Observation of 1- to 5-second microtremors and their application to earthquake engineering, part 1: Comparison with long-period acceleration at the Tokachi-Oki Earthquake of 1968, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **68**, 767-779.
- 坂尻直巳・成瀬聖慈・竹内文朗・吉川賢一・後藤典俊・太田 裕, やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (1)—八戸市における予備観測一, *地震 2*, **27**, 338-351.

- 佐間野隆憲・山崎吉高, 1986, 新潟市とその周辺におけるやや長周期帯域の地盤震動特性, 第7回日本地震工学シンポジウム論文集, 205-210.
- SANTO, T. A., 1960, The observation of microseisms at a wave gauge station—On the origin of micro-tremors (Part III)—, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **38**, 241-254.
- 塩野計司・太田 裕・工藤一嘉, やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (6)—微動に含まれる Rayleigh 波成分, 地震 **2**, **32**, 115-124.
- 瀬尾和大・佐間野隆憲, 地震動予測における微動の活用とその問題点, 1993, 文部省科学研究総合研究 (A) 研究成果報告集, 地震動に与える表層地質の影響に関する総合的研究, 198-200.
- 武村雅之, 1990, 1990 年度日本建築学会大会出席報告—地震動関連研究の動向—, 地震学会ニュースレター, **2**, 54-56.
- 田守伸一郎, 1992, 1992 年度日本建築学会振動部門の研究動向, 地震工学振興会ニュース, No. 127, 11-14.
- Toksöz, N. M., 1964, Microseisms and an attempted applications, *Geophysics*, **39**, 154-177.
- TSUTSUI, T. and Y., KOBAYASHI, 1989, Discontinuity of basement rock depth in eastern coast of Lake Biwa, discovered by observation of microseisms, *J. Phys. Earth*, **37**, 133-146.
- 時松孝次・宮寺泰生, 1992, 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, 81-87.
- 山中浩明・マリヤンドラビンスキー・鏡味洋史・1991, ロサンゼルスにおける微動の基盤・地盤同時連続観測, 1991 年度春季大会地震学会講演予稿集, No. 1, 107.
- YAMANAKA, H., K. SEO and T. SAMANO, 1989, Effects of sedimentary layers on surface-wave propagation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **79**, 631-644.