

学位論文題名

微動探査法による表面波位相速度推定の基礎的研究

学位論文内容の要旨

地下構造を探査する方法の1つに、地震波動を用いた屈折法や反射法などの地震探査法がある。これらの方法は高い精度で地下構造を推定できることから「精査法」として広く普及しているが、震源にダイナマイトやバイブレーター等を用いるために、観測が大がかりになり探査コストが高つく。さらに、騒音問題や安全面から人口の密集した市街地への適用は困難である。

最近、これらの探査法に代わる方法として微動を利用した探査法が研究・開発されている。微動は海の波浪・気圧変動・風等のような自然現象、または車・工場等のような人間の日常活動によって誘起される地面の微弱な震動である。微動は何時でも何処でも観測することができるため、この探査法は通常の地震探査法に比べて探査コストが少なくすむ。さらに、地震探査法の適用が難しい市街地等での地下構造探査が可能である。

微動は時間的にも空間的にも複雑な波動現象であるが、弾性論的には実体波や表面波または散乱波等の混在した波と考えられる。微動源の多くは地表面や海底面にあることから、微動中の波の勢力は実体波や散乱波より表面波の方が優勢であると考えられる。そのため、地震計を群列配置(以後、アレイと呼ぶ)して、微動中に含まれる表面波の位相速度を抽出すれば、得られた位相速度の分散から地下構造を推定することができるはずである。このような微動を利用した地下構造探査法を「微動探査法」と呼ぶ。微動探査法は表面波を利用した探査法であり、「概査法」として位置づけられるが、一方、通常地震探査法で得ることの難しいS波速度構造を推定できる特徴を持つ。

微動探査法を用いて地下構造を推定する場合、如何にして地下構造を反映した表面波の位相速度を観測するかが重要になる。つまり、微動探査法では限られた観測点数でアレイを構成しなければならない。そのような制約によって得られる位相速度には一定の限界がある。そこで、本研究は主に微動探査法における位相速度の推定限界について考察を行った。

微動は非常に複雑な波動現象であるが、このような微動の中に含まれる表面波の位相速度を、観測点アレイを用いて推定する方法として、空間自己相関法(SPAC法)と周波数-波数スペクトル法(F-K法)がある。どちらの方法も微動を定常確率過程と仮定する。観測の際、SPAC法はアレイが円形でなければならないが、F-K法はアレイの形に制限はない。ただし、SPAC法は複数の円形アレイを組み合わせることによって適用範囲を広げる工夫もなされている。この方法を拡張SPAC法(凌・岡田, 1993; 凌, 1994)と呼んでいる。

初めに、SPAC法およびF-K法における空間エリアジングから推定可能な位相速度の最小波長を定量的に求めた。SPAC法における空間エリアジングは円形アレイの円周上に展開する観測点数に関係する。円形アレイの最も単純な場合、すなわち正三角形アレイの場合、空間エリアジングはアレイ最短半径の2倍の波長以下で起きるので、この波長が推定可能な位相速度の最小波長となる。ただし、波の入射方向や入射する波の数によって、アレイ最短半径の2倍以下の波長領域でも位相速度を推定できる。

一方、F-K法における空間エリアジングはF-Kスペクトルのアレイ・レスポンスに関係する。例えば、正三角形アレイの場合、空間エリアジングはアレイ最短半径の $\sqrt{3}$ 倍の波長以下で起きる。このため、正三角形アレイにおいて推定可能な位相速度の最小波長はアレ

イ最短半径の $\sqrt{3}$ 倍である。

次に、SPAC法およびF-K法による推定可能な位相速度の最大波長を考察した。これは解析的に求められないので、数値シミュレーションによって推定した。それより、次のような結果が得られた。すなわち、

- 1) SPAC法では、波の到来方向や入射する波の数に関係なく、アレイ半径の10倍～14倍の波長までの位相速度を推定できる。また、波が多方向から入射する場合、相反定理によって、空間エリアジングを起こす波長以下でも理論値と一致する位相速度が得られる。
- 2) F-K法では、波が1方向から入射する場合、アレイ半径の14倍の波長までの位相速度を推定できる。
- 3) 波が2方向以上から入射する場合、ある周波数以下のF-Kスペクトルに縮重が生じ、その周波数領域の推定位相速度が理論値より高くなり、結果として、F-K法によって推定可能な位相速度の波長はアレイ半径の約3～7倍までとなる。

また、Noiseが含まれる場合の数値シミュレーションを行った。それより、次のような結果が得られた。

- 1) SPAC法は低周波数側では空間自己相関係数がNoiseの影響を受けて理論値より低くなり、結果として推定位相速度は理論値より小さくなる。
- 2) F-K法の場合、ほとんどNoiseの影響なく位相速度を推定できる。
- 3) SPAC法を適用する場合、低周波数領域の位相速度の推定精度を上げるためには、展開する観測点アレイを大きくすることである。

最後に、釧路市内の2ヶ所（TTRとTIS）で行った微動探査法の適用例を基に、SPAC法とF-K法の比較を行った。その結果、実際の微動観測でもF-Kスペクトルの縮重現象が起きており、縮重によって推定位相速度が見かけ上大きくなることが確認できた。この時、F-K法における推定可能な位相速度の最大波長はアレイ半径の5倍であった。また、SPAC法における推定可能な位相速度の最大波長はアレイ半径の10倍であった。実際の微動観測で得られたSPAC法およびF-K法による位相速度の推定可能な最大波長は、数値シミュレーションとよく一致している。また、F-Kスペクトルによって波が多方向から入射していることが確認でき、SPAC法を用いて空間エリアジングを起こす波長以下の位相速度が推定できた。

数値シミュレーションで得られた結果および微動探査法の適用例におけるSPAC法とF-K法の比較結果から、SPAC法はF-K法より位相速度を推定できる波長領域が広いと結論できる。以上から、SPAC法は微動探査法に最適な位相速度を推定する方法といえる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 岡 田 廣
副 査 教 授 島 村 英 紀
副 査 助 教 授 森 谷 武 男
副 査 助 教 授 笹 谷 努

学位論文題名

微動探査法による表面波位相速度推定の基礎的研究

微動を利用する地下構造の推定法を微動探査法と呼ぶ。基本原理は、1) 地表面に展開した多数の地震計観測網(略称アレイ)による微動の観測、2) 微動に含まれる表面波の分散(位相速度対周波数または周期の関係)の検出、3) その分散に最適の地下構造の推定、等からなる。推定される地下構造は平行層近似となる故に、この探査法は、従来の反射法あるいは屈折法地震探査を精査法とすれば、概査法として位置づけられる。しかしこの方法は従来の方法とは異なり、やっかいな制御震源を必要とせず、いつでもどこでも適用できる方法である。すなわち探査コストの軽減を図れる上に、従来の方法では探査不可能なところでも探査できる利点を有し、今後広く利用される可能性を秘めている。

微動探査法では、その基本原理により、微動に含まれる表面波の分散の推定が最も重要な研究課題である。その推定法として今までに2つの方法、「周波数-波数法($f-k$ 法)」と「空間自己相関法(SPAC法)」が開発されてきた。しかし両者の中その原理に表面波の分散を考慮しているのはSPAC法の方であり、 $f-k$ 法にそれはない。 $f-k$ 法は、微動中では表面波が他の波より相対的に優勢となることを暗に期待しているだけである。それでも微動利用の探査法としては、 $f-k$ 法の方が多く使われており、SPAC法はほとんど使われていない。しかし両方法について、実際的な観測様式、特に観測点の展開すなわちアレイの形や大きさと、分散の推定可能な波長領域(周波数範囲)との関係は今まで系統的に研究されていない。

本論文は、主に数値シミュレーションからこの課題を研究したものである。

1) 短波長側の適用限界については、「アレイレスポンス」に関する空間エリアシングから考察している。考え方の基本は観測点が直線上に展開されているときと同じである。

SPAC法の場合、アレイはその原理により円形でなければならないが、その最も単純な正三角形アレイでは、一般にアレイ半径の2倍の波長以下で空間エイリアシングが起ると考えられるので、これを推定可能な位相速度の最短波長と見積もる一方、現実には、微動は多方向から到来しており、そのためにさらに短い波長でも見積もれることを指摘し、これを実際の観測例で示している。アレイ半径の2倍の波長というのは一種ゆるい短波長限界とみなせることを導いた。

$f-k$ 法の場合、正三角形アレイでは、観測点間相互の最小となる距離の $\sqrt{3}$ 倍の波長となり、この場合も、SPAC法同様実際の観測例によりゆるい短波長限界となることを示した。

2) 長波長側の位相速度は、従来から、SPAC法よりも $f-k$ 法の方が大きく求められるといわれている。しかし、その原因は今なお解明されていない。申請者は長波長側の適用限界を推定する理論が見当たらないところから、これを数値シミュレーションにより考察した。

$f-k$ 法の場合、微動が多方向からの波で構成されていると、 $f-k$ スペクトルにある周波数以下で縮重現象が起こり、位相速度が真の値より大きく求められること、また縮重の起こる周波数は位相速度の波長すなわち地下構造とアレイの大きさに関係することを見出した。縮重現象を回避するためには適切なアレイ設計が必要であるが、それには未知の地下構造を掘りどころとしなければならないという一種の自己矛盾を内包している。結局、位相速度推定における長波長側の限界は、一つの地下構造モデルを基にアレイ半径の約7倍程度と推定している。しかしこれはシミュレーションでの推定で、それも到来する波の数とそれらの方向に関係することを明らかにしている。

SPAC法の場合、このような縮重現象は起こらない。それだけに位相速度推定の長波長側限界は $f-k$ 法より長く取れる可能性がある。 $f-k$ 法の場合と同様の地下構造モデルを基にこれを定量的に考察し、アレイ半径の10倍から14倍の波長になることを示した。なお釧路での観測データも解析し、その結果と数値シミュレーションの結果とを総合的に考察し、結局、SPAC法は $f-k$ 法より位相速度の推定できる波長領域が広い、より優れた探査法であるという結果を得た。

本研究により著者は微動探査法について新知見を得たものであり、物理探査学に対して新しく貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。