

学位論文題名

微動に含まれる表面波の位相速度の推定に関する研究

学位論文内容の要旨

従来から、地下深部の構造探査に、いわゆる「自然に有る情報」や「自然の送り出す信号」を利用する探査法が使われている。すなわち重力探査法、電気探査法、磁気探査法(MT法)などがそうである。これらの方法は、物理探査の分野では地質構造や地下資源を探査するために広く普及している地震探査法、すなわち反射法や屈折法に先立つ探査法として、そして時には、それらの探査法によって得られた地下構造を解釈するための補助手段として、広く利用されているいわゆる「概査法」である。

近年、地下構造を推定する新しい方法として、「自然の送り出す信号」すなわち「微動」を利用する地下構造探査法(微動探査法と略称)が研究されているが、これもその概査法の一つに数えられる。しかし、微動探査法には、上記のような概査法とは異なり、通常の方法や屈折法といった精査法と共通な弾性波速度で地下構造を推定できる可能性がある。したがって、この方法はいわゆる精査法に直接結びつく最も有力な概査法といえる。そしてまた、この方法は従来の概査法より高い精度で地下構造を推定できるポテンシャルを持っている。

微動は自然に豊富に存在し、いつでもどこでも容易に観測できる。それ故に、微動探査法は通常の方法より探査経費が少なく済み、安全への配慮も不要である。特に、通常の方法を適用し難い市街地や自然環境の保全が厳しいところで地下構造を推定する場合、この微動探査法が最も適している。

そのような微動探査法は地下構造の推定に、原理的には微動に含まれる表面波を利用する。そのために、今後この方法の実用化には、複雑な微動記録から如何にして表面波の位相速度を推定するかが主要な問題となる。本研究は、この問題を主に4つの章で考察する。

微動から表面波を検出するには、現在2種類の方法、すなわち周波数一波数法(F-K

法)と空間自己相関法(SAC法)が有効と考えられている。

F-K法を使って微動から表面波を検出する場合、最も重要な推定量の一つはF-K spectrumである。F-K spectrumの計算法にはいろいろな方法があるが、基本的にはCapon(1969)の方法が最もよく使われている。

第2章では、主にこのF-K spectrumの計算法の改良とその結果について考察する。

CaponによるF-K spectrumの推定の場合、時間領域に direct segment (あるいは、block averaging) 法を導入し、F-K spectrumに必要なcross-spectrumを、Fourier変換法によって計算する。しかし、この方法にはデータの選び方やspectrumの平滑化について、その適切さを客観的に判断する基準がない。また、Fourier変換法によって計算されたcross-spectrumは、平滑化が適切でないと、それはしばしば大きくバラつき、それがF-K spectrumに伝搬し、結局、位相速度に大きな推定誤差をもたらす。

本研究では、このF-K spectrumの基本量であるcross-spectrumの推定法を改良した。すなわちcross-spectrumの推定に、統計的あるいは確率的現象に対して適切な確率的modelを当てはめ、その本質的な面を表現する、赤池・中川(1972)による方法を導入した。具体的には、微動を確率的現象とみなし、それにAR modelを当てはめる。そして有限長の微動についてspectrumを推定する場合、微動にどのような確率論的modelを当てはめればよいか、その適切さを、赤池(1971)による客観的判断基準すなわちAICを利用した。この方法によって推定した位相速度とCaponの方法およびそれを簡便化した方法、すなわち松島(1990)の方法によって推定した位相速度とを比較し、AR model導入による方法がより優れていることを示した。

第3章では、従来のSAC法の拡張について考察する。

SAC法は、Aki(1957)によって初めて試みられた微動利用の地下構造推定法における重要なアルゴリズムである。彼は微動のような複雑な波動現象を時間、空間に関する定常確率過程であると考え、円形アレイでの微動観測データについて空間自己相関係数を定義し、それが伝搬性の波、すなわち表面波の位相速度を与えることを理論的に導いた。この方法は理論的根拠が整っており、非常に優れた微動の位相速度推定法にもかかわらず、その後20年以上ほとんど応用されることがなかった。

この方法は、観測に特殊な円形アレイを使うために、観測フィールドではアレイ展開にしばしば制約が生じる。SAC法の利点を生かすためには、この制約を取り除く必要

がある。そのための新しい方法—拡張空間自己相関(ESAC)法—を本研究で開発した。

ESAC法はSAC法の理論に空間自己相関関数が全方位でほぼ一定という仮定を導入したもので、これにより観測アレイの形に制約がほとんどなく、自由度を増やすことができるようになった。例えば、F-K法適用を前提としたアレイデータの利用も可能となった。ESAC法の原理は微動の上下動成分だけではなく、水平動成分の解析にも適用できるため、微動の3成分観測データからRayleigh波とLove波を分離する方法にも大幅な進歩をもたらした。本研究は、この方法を用いて円形アレイと任意アレイでの上下動微動記録に対して位相速度を推定し、F-K法による結果との比較を行った。ESAC法によれば、高周波側ではF-K法と同じ結果が、低周波側ではより低周波数までよい結果が得られた。なお、ESAC法はF-K法より計算が比較的簡単であり、パソコンが利用でき、かつ比較的少ない観測点数でも結果を出せるので、今後広い応用が期待できる。

第4章では、F-K法、SAC法、ESAC法によって推定した位相速度や波の到来方向を真の値の近似値として採用可能かどうかという基本的問題について、数値simulationによって考察した。F-K法、SAC法、ESAC法など、それぞれの方法がもつ問題点で解析的に解明できないところのいくつかを数値simulationにより明らかにすることができた。

例えば、noiseの割合が大きくてもF-K法とESAC法による結果にあまり影響がない。また、入力波の到来方向と位相速度の推定については、1) 1方向の場合、F-K法は真の位相速度、真の到来方向を与える。2) 複数方向の場合、F-K法は必ずしも真の位相速度、真の到来方向を与えない。3) 低周波側で得られる位相速度は一般に真の値より大きく、高周波側で得られる位相速度、到来方向は真の値によく一致する。

ESAC法は、4) 低周波側では位相速度の推定値は真の値より大きい、F-K法よりやや低周波数まで良い結果を与える。5) 真の値に近い推定値の低周波側への伸びは波長 λ とアレイの大きさ Δ に関係し、ESAC法の場合は、 $\lambda \sim (1.5 \sim 2.0) \Delta$ 、F-K法の場合は、 $\lambda \sim (1.0 \sim 1.5) \Delta$ である。6) 高周波側ではF-K法とESAC法とはよく一致する。7) 水平動成分の場合はESAC法によってもLove波を識別することができる。

第5章では、アレイを使って地震動を観測し、地震動に含まれる表面波が検出できることを考察した。地震動の場合、一般にそのパワーは微動より広い周波数領域にわたって大きい。その性質を、観測された3つの地震動について、広い周波数領域で表面波の位相速度を検出し、結果としてより深い地下構造の推定につながることを見出した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 岡 田 廣
副 査 助 教 授 森 谷 武 男
副 査 助 教 授 西 田 泰 典
副 査 講 師 笹 谷 努

学位論文題名

微動に含まれる表面波の位相速度の推定に関する研究

最近、地下構造の推定に、「自然の送り出す信号」すなわち「微動」を利用する新しい地下構造探査法（微動探査法と略称）が研究されている。この微動探査法は、その原理から言って、重力探査法、電気探査法等と同種の概査法であるが、精査法としての反射法・屈折法と同じ弾性波速度で地下構造を推定できる点で、明らかに他の概査法と異なる。この方法は精査法に直接寄与する全く新しい概査法である。

微動探査法は、その原理として、微動に含まれる表面波の分散性を利用する。現在、この方法について、複雑な微動記録から如何にして表面波の位相速度を推定するかが、主要な問題の一つになっている。申請者はこの問題を研究し、その成果を本論文の6つの章にまとめた。

第1章の序論では、初めに微動の最も基本的な性質＝時間的空間的定常性の考察について述べている。すなわち約12日間の微動のパワースペクトル変動を調べ、微動は日単位で見ると定常性は弱い、数時間単位で見ると強いこと、また通常の微動探査法のアレイ内のパワースペクトルについて空間変動を調べ、強い定常性のあることを明らかにした。次に、微動利用の地下構造推定に関する過去の研究をreviewし、本研究で取り上げるべき課題の輪郭を明確にしている。

第2章では、微動から表面波を検出するための有効な2種類の方法、すなわち周波

数一波数法 (F-K 法) と空間自己相関法 (SAC 法) を review し、F-K 法の重要な推定量、F-K スペクトルの計算法の改良とその結果について述べている。すなわち広く使われている Capon (1969) の F-K spectrum 推定における cross-spectrum の平滑化操作には、主観や経験を要するなど不備のあることに注目し、従来 Fourier 変換法によって計算していた cross-spectrum を、統計的あるいは確率的現象に適切な確率モデルすなわち AR model の当てはめによって計算するように改良した。これにより、cross-spectrum の平滑化の適切さは客観的判断基準 AIC によって判断できるようになり、その結果位相速度は従来より高い精度で推定できるようになった。

第 3 章では、従来あまり使われていなかった空間自己相関法を適用する際のアレイパターンの制約に注目した。まず適切な野外観測とそのデータ解析の十分な吟味から、空間自己相関関数が全方位ではほぼ一定という仮定の妥当性を見出し、これよりアレイパターンの制約を取り除いて、新しい方法「拡張空間自己相関法」(ESAC 法) を考案した。これにより、観測アレイの設計は自由度が増すとともに、形が全く異なるアレイでの観測データや観測時間の全く異なるデータでもそれらの併合処理が可能となり、結果として微動探査法に広い応用性を付加した。

第 4 章では、F-K 法、SAC 法、ESAC 法の 3 方法のそれぞれについて、位相速度あるいは波の到来方向の推定精度を検討するために、各方法について数値シミュレーションを行った。その結果、3 つの方法の中で ESAC 法が総合的に最も優れていることを明らかにした。ESAC 法によれば相対的に小さいアレイでもより長い波長まで位相速度を推定できるという結果は特に重要で、これにより微動探査法は従来より、より柔軟なしかもより広い応用性をもつようになった。

第 5 章では、微動探査法における微動パワーの低い周波数領域での困難な位相速度推定は、地震動によって十分補完されることを、アレイ観測された 3 個の地震動の解析によって示した。これは観測の仕方によっては地震動は地下構造の推定に利用できるという新しい話題提供であり、一方、地震動の大部分は表面波で構成されているという地震動についての新しい性質の発見でもあった。第 6 章は、本論文の結論である。

以上、申請者は「概査法」としての「微動探査法」について多くの点で優れた研究成果を上げた。審査員一同は、申請者が博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。