

学位論文題名

3成分空間自己相関法による微動に含まれる
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

微動探査法は、微動を群列地震計配置(アレー)で同時に観測することにより、微動に含まれる表面波の位相速度の分散関係を満足する地下速度構造を推定する手法である。現在までの研究では、表面波のうちRayleigh波を用いている。この理由は、Rayleigh波の位相速度は微動の上下動成分を観測すれば検出可能なためである。微動に含まれるもう一つの表面波であるLove波の位相速度も同時に検出可能ならば、地下構造推定の精度が向上することが考えられるが、実測データからLove波の位相速度を検出した事例はない。そこで、本研究ではRayleigh波及びLove波の両位相速度を用いて地下構造を推定することを目指して、3成分の微動をアレーで観測することにより微動に含まれるLove波の位相速度を検出することを目的とした。

空間自己相関法は微動を定常確率過程と考え、波動の統計的性質を位相速度に結び付けている。本研究では、この空間自己相関法の理論を実際の観測に適用するため理論的・解析的な工夫をおこなった。特に、実際の微動記録ではノイズの混入が避けられないため、ノイズが存在してもLove波の位相速度を精度よく推定する解析法の確立を目差した。

本研究の内容を以下に示す。

第1章では、微動探査法の有効性を示し、本研究の目的であるRayleigh波とLove波の両位相速度を用いる意義について示した。

第2章では、本研究で基礎となるAkiの空間自己相関法の理論と、それを利用した岡田・松島の微動に含まれるRayleigh波及びLove波の識別方法の基礎理論を記述した。

第3章では、実測データに空間自己相関法を適用する新たな解析手法を提示した。Love波の位相速度はAkiの空間自己相関法を拡張すれば理論的には推定可能であるとされてきた。しかし、その理論式は強い非線形性を持ち、観測された微動から直接に位相速度を推定することは非常に難しい。そこで、実測データにこの理論を適用するために、拡張された手法を用いて水平動微動からLove波の位相速度を推定する手法を新たに提示する。ここで、拡張空間自己相関法とは、相関距離と周波数の2変数関数で

ある空間自己相関係数を離散化した相関距離で観測し、解析時には周波数で離散化して、Love波の位相速度を推定する手法である。さらに本研究では、最適解を判断するために残差分布を記述し、位相速度推定が適切に行われているかを判断する方法を提示した。微動中に含まれるRayleigh波の位相速度は微動の上下動成分のみから推定可能である。そこで3成分微動観測記録を、上下動からRayleigh波の位相速度を推定し、水平動解析時にはRayleigh波位相速度は既知のものとして扱った。また、上下動から推定されたRayleigh波の位相速度をLove波位相速度の推定探索範囲の上限・下限の決定に利用する方法を提案した。

第4章では、Love波位相速度推定時には既知として使用するRayleigh波の位相速度の推定精度が高く保たれる必要があるため、自己回帰（AR）モデルを利用した上下動空間自己相関法の改良を行った。これは、相関関数算出過程においてARクロススペクトルを導入し、相関係数の推定精度の向上を目指すことを目的としている。従来の帯域フィルタやFFTを利用した相関関数算出法ではデータ解析時における最適なバンド幅が設定されていない場合に生じる位相速度の周期的なうねりを消去することが可能となり、連続性の高い位相速度の分散関係を推定可能である。実際に盛岡市域で観測された微動にこの手法を適用することにより、それを証明した。

第5章では、空間自己相関法を利用することにより微動の長波長成分を検出可能であることを実際の観測から検討した。地下構造が異なると考えられる盛岡市域4地点において複数の上下動微動のアレー観測を実施した。その記録に空間自己相関法と周波数-波数解析法を適用し、Rayleigh波の位相速度の検出可能な最大波長がアレーの最大地震計間隔の何倍に相当するかを検証した。4地点における解析結果から、周波数-波数解析法ではアレーの最大地震計間隔の1.2倍から1.9倍の波長まで、空間自己相関法では3.6倍から8.4倍の波長まで検出することが可能であることを経験的に示した。空間自己相関法が周波数-波数解析法と比べ4倍程度長い波長を検出可能であることが観測から明らかになった。限られたアレーの微動観測から広い周波数帯で位相速度を得るためには、空間自己相関法が微動探査法として有効な手法であることを実証した。

第6章では、盛岡市域の2地点（岩手大学、盛岡工業高校）で独自にアレー観測された3成分微動に本研究で示した水平動空間自己相関法の拡張された解析法を適用し、Love波の位相速度の解析を行った。その結果、岩手大学では3Hzから10Hzの周波数帯で800m/sから200m/sに滑らかに変化するLove波の位相速度を推定することができた。盛岡工業高校では、1Hzから3Hzの周波数帯で450m/sから200m/sに滑らかに変化するLove波の位相速度を推定することができた。また、その観測された位相速度は同地点の地下構造モデルから理論的に計算されるLove波のものと調和的であることが検証された。よって、本研究により、微動探査法において従来ほとんど利用しえなかったLove波の位相速度の分散が実際の探査でも有効であることが示された。

以上の結果、理論的には可能であると考えられていた、Rayleigh波Love波を用いた微動探査法が実際

のデータに適用されそれを高精度に保つ新しい解析手順が確立された。本研究により，3成分微動アレー観測によりRayleigh波及びLove波の両位相速度を用いた簡便で応用性の広い地下構造探査法構築への展望が，理論的にも実際の応用手法としても確立された。

学位論文審査の要旨

主査	教授	岡田	廣
副査	教授	小山	順二
副査	助教授	森谷	武男
副査	助教授	笹谷	努

学位論文題名

3成分空間自己相関法による微動に含まれる 表面波の位相速度の推定に関する研究

複雑な地表面の振動である微動は、弾性論的には、実体波、表面波、散乱波等の集まりである。その中で振動エネルギーが圧倒的に優勢な表面波を微動から抽出して地下構造を推定する研究が最近活発に行われている。ただしその多くは、微動中のRayleigh波の分散を求め、深さ3,000m級の深部地下構造をS波速度として推定する研究が中心である。

近年、この分野では、比較的浅部の地下構造、特に都市部におけるS波速度の地下構造推定の研究に多くの関心が集まっている。都市の発達する堆積平野では、国内外を問わず現在、地震防災やあるいは強震動の研究に必要な地下構造データ、とりわけ地震防災にとって重要なS波速度の地下構造データが極めて乏しく、その収集が急がれているからである。しかし多くの場合、従来の地震探査法の都市部への適用は技術的に困難が多く、どこもその種のデータの収集は進んでいない。物理探査学の分野では、都市部に適用可能な新しい探査法の研究が緊急課題として注目されている。何時でも何処でも観測可能な微動を利用する地下構造探査法はそれに応え得る最適の探査法であり、申請者が本論文で取り上げた「3成分空間自己相関法」はまさにその範疇に入る。

1989年、岡田・松島により微動中の表面波からS波速度分布を効果的に推定するために、Love波の検出法の理論と解析アルゴリズム、すなわち3成分空間自己相関法による探査法が提案された。しかし、実際のフィールドにこの探査法を適用することは容易でなく、わずかの試みと数値シミュレーションによる検証に止まっていた。

申請者は、この3成分空間自己相関法による微動中のLove波の検出能力の向上に向け、データ解析法の工夫、改良を行うとともに、それを実際のフィールドで試み、その有効性を実証した。

本研究の成果の一つは、Love波およびRayleigh波の位相速度とパワーを理論的には同時に解ける特性方程式をノイズの多い実測データに当てはめた場合容易に解くことが出来ないという問題があり、これをLove波、Rayleighの相対的パワー比を導入し、その観測値と理論値との残差二乗和最小を条件として解くことで解決した点である。

申請者は、実測データにこの改良した解析法を有効に利用するために、相関距離と周波数の2変数関数である空間自己相関係数を観測時には相関距離で離散化し、解析時には周波数で離散化して、観測値を適合し、位相速度を推定するという空間自己相関法の拡張を行った。またLove波の位相速度を精度よく推定するためには、それに非線形的に関与するRayleigh波の位相速度をより高い精度で推定する必要があり、その解決法として、相関関数の算出過程においてARクロススペクトルを導入するなどの工夫を行った。

新たに拡張、工夫を施した空間自己相関法は、従来多用されている同種のデータ解析法である「周波数一波数法」より表面波のより長い波長成分が検出可能であることを実際のフィールド実験で実証した。その結果によれば、空間自己相関法は周波数一波数法に比べ、約4倍長い波長の波の位相速度をも検出可能である。時間的にも空間的にも限られた微動観測により、位相速度をできるだけ広い周波数帯で推定するには、空間自己相関法の方が探査法としてより優れていることを実証したと言える。これはかねてから数値シミュレーションで指摘されていたことではあるが、実際のフィールドでこれを実証したのは本研究が初めてである。

申請者は、さらにその有効性とLove波の位相速度の推定を実際に盛岡市の2ヶ所で実験し、最近の中心的課題である都市部における比較的浅部のS波速度の精度の良い地下構造推定に優れた成果を上げ、この方法を安定した・信頼度の高い探査法へと発展させ、物理探査学の研究に新しい知見をもたらした。

よって審査員一同は、申請者が北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。