

氏名	しら いし ひで たか 白石英孝		
授与学位	博士(学術)		
学位記番号	学術(環)博第86号		
学位授与年月日	平成20年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院環境科学研究科(博士課程)環境科学専攻		
学位論文題目	複素コヒーレンス関数を用いた微動の位相速度計測法に関する研究		
指導教員	東北大学教授 新妻 弘明		
論文審査委員	主査 東北大学准教授 浅沼 宏	東北大学教授 新妻 弘明	
	東北大学教授 佐藤 源之	東北大学教授 佐藤 春夫	(理学研究科)

論文内容要旨

地下の横波速度構造は、地震被害の推定に使われる強震動予測に必須の情報であるとともに、近年では地下水汚染問題に対処する際の利用についても検討が行われている。横波速度構造の推定には、これまで反射法・屈折法などが用いられてきたが、長大な測線や制御震源が必要となるため、必ずしも容易に実施できるものではなく、特に都市域での適用には困難がともなう事例が多い。こうしたなかで近年、微動探査法と呼ばれる方法が注目され、その実用化が進められてきた。本方法は、主として表面波が卓越する微動と呼ばれる微振動を地表に設置した地震計アレーで観測し、その位相速度の分散曲線を求め、逆解析することにより横波速度構造を推定するものである。この方法は受動的計測であることから従来法と比べて簡便かつ低コストに実施できるという利点があるが、位相速度の計測で使われる空間自己相関法(SPAC法)には観測上の制約が存在し、それを解消した新しい位相速度計測法の開発が切望されてきた。

本研究は、以上のような現状を踏まえて、任意の配置、任意の観測点数で位相速度を計測できる新たな方法を導くために行われたものである。本研究の特徴は、レーリー波複素コヒーレンス関数(RCCF)の理論式を用いてアレーの信号出力を記述し、そこに含まれる波数を数学的に決定することにより、位相速度を推定する方法を新たに導出したことにある。この方法を小規模なアレーに適用し、その妥当性を実証した。さらに、この新たな計測法について、既設地震観測網を用いた観測や帯水層分布の推定への適用可能性を実データの解析および数値実験により検討した。また、地球物理学や物理探査の分野で近年注目されている地震波干渉法についてRCCFを用いた検討を行い、RCCFが地震波干渉法の原理についても説明能力を有することを示した。

以下に各章の概要を示す。

第1章 緒 論

本章では、はじめに本研究の背景を概説した後、微動探査法の現状および既存の位相速度計測法の特徴を整理して示した。特に既存の代表的手法である SPAC 法について、その原理の概要と問題点をまとめて示した。また本研究の目的および目的を達成するための具体的な取り組み方法を述べるとともに、SPAC 法に関連する既往の研究を整理して示し、さらに本論文の全体構成と概要を述べた。

第2章 レーリー波複素コヒーレンス関数の定式化とその方位特性

現行の微動探査法では、アレー観測で得られる微動記録を数学的に記述する方法が確立されていなかった。そこで本研究では、2つの観測点の信号出力から計算されるレーリー波複素コヒーレンス関数 (RCCF) をレーリー波のフーリエスペクトルから理論的に導き、それを用いてアレー全体の出力を表現することとし、本章においては RCCF の定式化方法とその方位特性を示した。

理論的に導かれた RCCF は、第1種0次 Bessel 関数 ($J_0(kr)$: k は波数, r は観測点間距離) および高次の Bessel 関数を含む無限級数で構成されていた。このうち無限級数は震源の方位角をパラメータとして含んでいるため、方位依存性をもつ成分である。これに対し $J_0(kr)$ には方位依存性が無く観測点の地下構造だけで決まる成分に相当するため、これを抽出することにより位相速度に関する情報を検出できる。本研究で実施した定式化により、以上述べたように、RCCF は方位依存性が異なる2つの成分で構成されていることが明らかとなった。

第3章 レーリー波複素コヒーレンス関数を用いた位相速度の直接同定法

第3章には、任意の配置、任意の観測点数で位相速度を計測できる新たな計測法の導出過程を示した。その内容は次の3つに分けることができる。すなわち、1) SPAC 法を対象とした位相速度検出原理の検討、2) 配置の自由度を高めた円形アレーによる位相速度計測法の導出、3) 任意形状かつ少数の観測点による位相速度計測法の導出、である。これらの概要は以下に示した通りである。

SPAC 法においては、これまで位相速度の詳細な検出原理や配置の制約の本質的な原因が明らかにされていなかった。そこで本研究では、第2章で導いた RCCF を用いて SPAC 法の演算過程を再現し、それを詳細に観察することにより、位相速度の検出原理等を明らかにした。その結果、SPAC 法で使われ

る方位平均と呼ばれる操作は, RCCF から $J_0(kr)$ を抽出するためのひとつの解法に相当することを明らかにした。また, この解法を有効に機能させるためには, 円周上の観測点を等間隔に配置することがひとつの条件であり, これが配置の制約の本質的な原因となっていることを明らかにした。その他, SPAC 法による位相速度の推定値に含まれる誤差の定量的な評価方法および計測を効率的に行うために必要な配置の条件等を導いた。さらに, こうした SPAC 法を対象とする一連の検討結果に基づいて, RCCF から $J_0(kr)$ を直接同定できれば SPAC 法とは異なる新たな位相速度計測法が成立する可能性があることを明らかにした。本研究ではこの方法を直接同定法と名付けた。

次に, 直接同定法の考え方を円形アレーに適用し, 配置の自由度を高めた新たな位相速度計測法を導いた。円周上の観測点を任意に配置した円形アレーでは, 中心および円周上の観測点から複数の RCCF が得られる。この RCCF を用いて連立方程式を構成し, その解として $J_0(kr)$ を求める方法を検討した。RCCF で連立方程式を構成する際には無限級数を含む RCCF を有限の項で近似する必要があり, 解として得られた $J_0(kr)$ には打ち切り誤差が含まれる。そこで打ち切り誤差の吟味を行い, その誤差が実用上無視しうる微小値となる条件式を導くとともに, 誤差と円周上の観測点の位置とが密接に関係していることを明らかにした。また, この条件式を満たす範囲内では, 円周上の観測点を任意に設置できることを示した。さらに円周上の観測点を省略する方法を提案し観測の簡便化を図った。これらの検討によって得られた円形アレーを対象とする直接同定法を実際の位相速度計測に適用し, 理論の妥当性を検証した。この実証試験の結果から, 1) 直接同定法による位相速度の推定値は SPAC 法による推定値と良好に一致すること, 2) 直接同定法では SPAC 法と比べて小規模なアレーで位相速度の推定が可能であること, 3) 位相速度の推定値に含まれる理論的な誤差は直接同定法によって予測することが可能であり, 予測された誤差は実際の観測結果とも調和する傾向にあること, などを明らかにした。

一方, 任意形状のアレーについては, 最小自乗法を併用した探索によって RCCF の観測値と理論値との残差を最小とする波数を求める方法を導いた。この方法の性能を明らかにするために数値実験による検討を行い, 次のような性質をもつことを明らかにした。1) RCCF を有限の項で近似する際の近似精度を高めることにより, 高周波数域での位相速度の推定精度を向上させることができる。しかし, 低周波数域での改善効果は見られない, 2) 数値実験で検討した限りでは, ナイキスト条件を満たす周波数領域内では, 微動の到来方位に対する依存性はみられない。つまり震源がどのような方位にあっても正しい位相速度の推定が可能である。3) 複数の近接した震源から微動が到来する場合でも正しい位相速度の推定が可能である。4) 本計測法は任意の配置と観測点数で位相速度の計測が可能であり, 最少の観測点数

は3点であるが、観測点数が少ない場合、位相速度を推定できる周波数帯域が狭まり位相速度を推定可能な上限周波数が低下する傾向を示す。この計測法の実証試験により理論の妥当性を検証したところ、理論に従う傾向が現れることが確認されるとともに、SPAC法による位相速度推定値とも調和する結果を与えることが確認された。その結果、本計測法を用いることにより、任意配置かつ少数の観測点（最少3点）のアレーによって正しい位相速度を計測できることを示した。

第4章 レーリー波複素コヒーレンス関数を用いた新たな計測法の適用可能性に関する検討

第4章では、本研究で導いた位相速度計測法の新たな適用可能性を検討するために、既設地震観測網等の観測記録に本計測法を適用してその適用条件等を明らかにした。また、本計測法を帯水層の分布推定に適用しうる可能性について数値実験による検討結果を示した。

検討対象とした既設地震観測網は、アレー規模（20km 前後～数 10m）および観測記録長（連続波形またはトリガ波形）が異なる複数の観測網である。これらの観測記録を用いて本計測法の適用条件について検討を行ったところ、1)アレー規模については、関東地方平野部を例として 0.2Hz 付近の位相速度を求めるためには観測点間距離 5km 以下、1Hz 付近では 0.25～0.4km がおよその目安になること、2)記録長としては連続波形が望ましいこと、3)遠方場の仮定が成立し、かつアレー内部に震源をもたないこと、等の条件が得られた。

帯水層の分布推定については、地表面で位相速度を計測しその分散曲線の形状の変化から地下の帯水層分布を推定しうる可能性について数値実験による検討を行った。その結果として、帯水層の有無や深度の変化は、分散曲線の速度変化として広い周波数範囲に現れる可能性があることを示した。また都市部などアレーの設置に制約を受ける条件下でも、直接同定法を適用することにより観測目的に応じた位相速度の計測が可能となることを示した。

第5章 結 論

第5章は結論であり、以上に述べた各章の要点をまとめて示すとともに、本研究全体を通じて得られた今後の検討課題について示した。本研究で導かれた成果は、微動探査法における位相速度の計測だけでなく一般の波動を対象とした速度計測にも適用しうる可能性があるため、より広い分野に応用できるものと考えられる。

付録 空間的ナイキスト条件を超えた長間隔2点アレーの時空間応答特性

付録では、近年、地球物理学などの分野で注目されている地震波干渉法について、RCCFを用いて検討を行った結果を示した。地震波干渉法とは、2つの観測点間を伝わる表面波の群速度を相互相関関数によって計測し、地下のイメージング等を行う技術であり、その背景となる原理は未だ確立されていない。この検討により、RCCFが地震波干渉法の原理についても説明能力を有することを明らかにした。

論文審査結果の要旨

堆積平野部における強振動予測、あるいは地下水汚染検出を目的とした透水帯分布推定のためには、地下を伝搬する横波の速度構造モデルが重要である。海洋波浪や交通により発生する微動の位相速度は分散性を有しており、これにより横波速度構造を推定可能であるため、微動探査法は横波速度構造モデルを直接的に同定可能な数少ない手法のひとつとして実用化されてきた。本手法は受動的計測であるため、簡便性および経済性に優れているが、既存の手法ではセンサの配置に関する制約が大きく、近年、都市部での計測に支障をきたす事例が増えてきている。本研究は、レーリー波複素コヒーレンス関数という新たな概念を用いてセンサ配置の自由度が大きい微動の位相速度計測法を新たに導出することを目的として実施したものであり、その成果を取りまとめた学位論文は全5章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景、既往の研究、研究の目的、解決すべき課題等について述べている。

第2章では、レーリー波複素コヒーレンス関数の導出とその特性について述べている。ここでは、レーリー波のフーリエスペクトルをもとに2観測点間での複素コヒーレンス関数をベッセル関数の無限級数として表現できることについて述べている。さらに、本関数の方位指向性は無指向性成分と指向性成分とに分離できることを明らかにしている。これは、第3章で述べている新たな位相速度計測法の導出につながる重要な知見である。

第3章では、レーリー波複素コヒーレンス関数を用いて位相速度を直接的に同定する新たな計測法について述べている。ここでは、まず、既存の手法の解析原理をレーリー波複素コヒーレンス関数により解釈し、これまで陽に示されていなかった位相速度の推定原理を明らかにしている。この知見をもとに、複素コヒーレンス関数を代数方程式として解くことにより、任意に配置されたセンサで取得した信号から位相速度を直接的に同定できること及びセンサの配置が誤差に与える影響について述べている。さらに、実証実験の結果から本手法の妥当性についても検討している。これらは、センサ配置の自由度を大きく向上させた新たな位相速度計測法の原理と有効性を示した重要な成果である。

第4章では、第3章で導出した新たな計測法を適用可能な例として、既存の地震観測ネットワークを用いた横波弾性波速度構造モデル推定、および浅部帯水層検出を取り上げ、その実現可能性について検討している。ここでは実データの解析及びシミュレーションにより、具体的解析法、性能限界、今後の研究課題等を具体的に検討している。これは、本手法の実用化に向けた重要な知見である。

第5章は結論であり、本研究の成果をまとめるとともに今後の展望について述べている。

以上、本研究は強振動予測および浅部地下水汚染検出のために重要な横波速度構造の計測に関して、微動を用いた新たな計測法を導出し、その性能を実証するとともに、今後の展開についても検討しており、環境科学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(学術)の学位論文として合格と認める。