



Title	単一観測点の地震記録の自己相関関数を用いた地下構造の不整形性推定に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	中川, 尚郁
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16350号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95049
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Naofumi_Nakagawa_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 中川 尚郁

学 位 論 文 題 名

単一観測点の地震記録の自己相関関数を用いた地下構造の不整形性推定に関する研究
(Estimation of Three-Dimensional Velocity Structure Based on Autocorrelation Functions Using
Seismic Ground Motion Records at a Single Station)

地震動に耐えうる構造物を設計するには、適切な入力地震動の設定が不可欠であり、そのためには震源特性、地震波の伝播過程、ならびに建設地点直下およびその近傍の地下構造が地震動に与える増幅効果を精密に評価する必要がある。特に地下構造は地震動の増幅特性に大きく影響するため、浅部から深部で正確な推定が重要である。今日までに、地震記録や物理探査データを用いた地下構造推定手法が多く開発され、地下構造も公開されてきている。しかし、深部地下構造の推定結果は手法によって顕著な差異が現れることがあり、不整形な地下構造が波動場の複雑性に関与し、平行成層構造仮定を用いた解析手法の限界が示唆されている。また、近年、地震波干渉法を用いた地下構造のチューニングが進展している。この手法は、単一観測点で得られた地震記録の自己相関関数から直達波と反射波の共通の走時差を抽出し、既存モデルを修正するものである。しかし、平行成層構造仮定に基づくため、複雑な地下構造への適用には課題が残る。本研究では、複雑な地下構造を有する地域の単一観測点で観測された地震記録を対象に、地震記録の自己相関関数を波線経路ごとに分類し、地下構造の不整形性を推定することを目的とする。本論文は全 6 章で構成され、以下に各章の概要を示す。

第 1 章「序論」では、本研究の背景と目的について述べる。地震被害の軽減に向けた設計用入力地震動の作成および地震観測網の発展に関する歴史的背景を整理し、3 次元地下構造モデルの必要性、実施例、およびこれらに付随する課題を指摘した。従来の地下構造推定手法を概観し、平行成層構造仮定の限界や高コスト等の課題を指摘した。さらに、地震波干渉法および自己相関関数解析の歴史や適用事例を整理し、本研究における解析手法との違いを明確にした。特に、本研究で使用する不整形構造に基づく自己相関関数解析と従来の自己相関関数解析における地下構造推定に関する解釈を示し、不整形を含めた構造推定手法となる潜在性を述べた。これにより、本研究が地下構造推定において持つ学術的意義を明確にし、複数の地震観測点に適用することで、3 次元地下構造モデルの高精度化に資する手法になることを示した。

第 2 章「地震記録の自己相関関数解析」では、第一に研究対象とする地域に関して、2018 年北海道胆振東部地震で建築物に危険な地震動が発生した勇払平野を対象とすること、浅部地下構造の推定がなされ、地震動特性を説明する一定の成果が得られているものの、深部に関しての議論が不十分であること、等の選定理由を述べた。対象地域の形成過程について、地質学および地形学的観点から整理し、既存の地下構造モデルから地下構造の不整形性を確認した。次に、2018 年北海道胆振東部地震の余震の震源分布を整理し、臨時観測により得られている連続記録から地震記録を抽出した。ここで、本章から第 4 章における解析の基盤となる地震記録の自己相関関数の計算手法に関して整理した。その後、収集した地震記録を用いて自己相関関数を計算した。また、既存の地下構造モデルにより計算される理論自己相関関数を求め、地震記録の自己相関関数と比較し、既存構造の層境界深さ

を検討した。

第3章「地震記録の自己相関関数の変動」では、震源情報を基に地震記録の自己相関関数の形状を詳細に分析した。震源が近い地震記録の自己相関関数においては、浅部の層境界の反射に対応する位相のシグナルが明瞭に観測され、これがスタック処理によってさらに強調されることを確認した。一方で、深部層境界に対応する位相のシグナルは、地震ごとに異なる特徴を示すことが分かった。この傾向をさらに解析するため、震源の空間分布に基づいて地震記録の自己相関関数を分類した結果、共通の層境界反射に関連すると考えられるシグナルが強調され、さらにそのシグナルが震源の空間分布に関連して推移することを見いだした。これらの結果から、自己相関関数の形状が波線経路に密接に関連している推察され、不整形構造の推定に用いられる情報となることが示唆された。

第4章「不整形構造を用いた自己相関関数の数値実験」では、第3章で観測された地震記録の自己相関関数の変動する要因を究明するために、離散化波数法、3次元有限差分法、およびレイトレーシングを用いた数値実験を通じて検討し、さらに走時差の推移を目的関数とする逆解析による不整形構造の推定可能性を評価した。まず、離散化波数法を用いて、2次元の平行成層構造と点震源仮定を仮定したシミュレーションから、震源放射特性係数が自己相関関数に及ぼす影響を解析した。その結果、直達波と反射波の放射特性係数が地震記録の自己相関関数に影響することが明らかとなった。次に、3次元有限差分法を用いて平行成層構造と不整形構造を仮定したシミュレーションを実施した結果、両構造で走時差の変動に異なる傾向が見られた。特に、不整形層境界が他層境界の走時差にも影響を与えることが確認され、自己相関関数の形状が不整形構造の影響を受けることを示した。さらに、震源分布に基づく走時差の推移を分析するため、一様に傾斜した基盤構造に平面波が入射するモデルを仮定してシミュレーションを実施した。このデータを基に基盤面の深さと傾斜の逆推定から、設定した構造に近い正解値が得られ、自己相関関数を活用した不整形構造の推定可能性が示された。最後に、不整形構造が波線経路に及ぼす影響を分析するため、3次元地下構造モデルを用いてレイトレーシングを実施した。その結果、不整形形状により観測点に到達する波線経路が複数存在する場合があることが確認され、同一層境界から複数の反射波が生じること、およびそれが自己相関関数に対応する複数のシグナルをもたらすことが示された。

第5章「実用に向けた検討」では、不整形構造の推定に向けた一般的なアプローチについて議論した。まず、既往の文献で得られた自己相関関数解析の結果と、第3章で示された自己相関関数の形状変動との相違点を明確にし、従来の平行成層構造仮定に基づく解析手法が抱える限界を指摘した。既存の研究では、自己相関関数は主に平行成層構造に基づく解析が行われており、地下構造が不整形である場合の影響が十分に考慮されていなかった。本研究では、地下構造の不整形性が自己相関関数の形状に強く影響を与えることが明らかとなり、これをもとに自己相関関数解析を再解釈した。さらに、第4章での数値実験結果を基に、自己相関関数の形状が層境界の不整形性による波線経路の複雑化に起因することを確認した。この結果により、自己相関関数が不整形構造を推定する有効な指標となる可能性が示された。加えて、自己相関関数を用いた不整形構造の推定方法を提案し、従来手法の限界を克服する新たなアプローチの実現に向けた議論を行った。

第6章「結論」では、本論の成果をまとめ、今後の課題とその展望についてまとめた。