

氏 名	しら いし かず や 白 石 和 也
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2734 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 社 会 基 盤 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	特性曲線法弾性波動シミュレーションと地震波干渉法による地下構造探査に関する研究

論文調査委員	(主 査) 教 授 松 岡 俊 文	教 授 芦 田 讓	教 授 石 田 毅
--------	----------------------	-----------	-----------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、特性曲線法による高精度弾性波動シミュレーション手法の研究開発と、地震波干渉法による地下構造探査の高度化のための研究と手法開発について論じた結果をまとめたものであって、6章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の背景と弾性波動シミュレーションと地震波干渉法に関する概要を示し、本研究における研究開発の目的を述べている。

第2章では、特性曲線法による弾性波動シミュレーションの定式化を行っている。弾性体中の運動方程式と応力 - 歪関係式から実体波 (P 波と S 波) について二階波動方程式の導出し、それらの波動場が一階波動方程式の解として表される特性曲線に沿って伝播することを示し、一般的な特性曲線法の定式化について概説している。次に、特性曲線法が一階波動方程式 (伝達方程式, 移流方程式) を評価することに他ならないことから、数値的な評価を行うために必要な差分スキームについて検討した。これまで一階波動方程式を解くために用いられてきた各種の数値計算法と、本研究で採用した CIP (Cubic Interpolated Profile) 法について、差分スキーム, 安定性, 分散性について比較して数値解法の性能評価を行った結果、CIP 法は一階波動方程式の数値計算に最適であることがわかった。CIP 法は波動場とその空間微分の連続性を境界条件として格子間を三次関数で近似するという工夫により、高周波成分の波を含む場合にも数値分散の少ない安定した計算ができる。そして、粒子速度と応力からなる運動方程式と応力 - 歪関係式から、弾性波動場を記述する一階波動方程式を導き、特性曲線法による弾性波動シミュレーションを定式化した。具体的には、運動方程式と応力 - 歪関係式を行列表記した後、方向分離および係数行列の対角化を行うことで波の各成分 (P 波, SV 波, SH 波) について進行波と後退波に対する一階波動方程式が導いた。さらに、地球物理学における諸問題を解くために必要となる自由表面や液体 - 固体境界に代表される各種境界条件を設定した。境界条件は波動場の連続性または消散によって記述され、CIP 法においては物理量と空間微分値の両方を計算するため、位相を考慮した仮想的な波動場を導入することで理論的な境界条件を満たすことが容易である。境界条件を設定したことにより特性曲線法による現実的な弾性波動場のモデリングを可能とした。

第3章では、第2章で定式化した CIP 法を差分スキームとして利用した特性曲線法による弾性波シミュレーションの数値計算例を示している。単純なモデルから複雑なモデルへといくつかの例を挙げて境界条件の妥当性や本手法の特徴等が示された。半無限媒質, 階段状の境界をもつモデル, 標高変化のあるモデル, 液体 - 固体境界を含むモデル, ランダム不均質媒質などを対象に数値計算を行った結果、従来広く用いられてきたスタッガード格子を用いた有限差分法では数値分散が生じるような厳しい条件下や速度コントラストの大きなランダム不均質モデルにおいても安定した計算ができ、開発されたシミュレーション手法が有効であることが示された。

第4章では、新しい信号処理技術である地震波干渉法の理論について述べられている。まず、コンボリューション型相反定理とコリレーション型相反定理, および時間反転不変の原理から、異なる二点で観測された波動場の記録を相互相関処理することで二点間の波形記録が合成できるという地震波干渉法の理論について詳述している。このとき、震源の分布とその

とき合成される波形記録から、相互相関によるグリーン関数合成の鍵となる停留位相に関して検討し、この概念は探査計画段階やデータ解析段階において役立つことが示された。

第5章では、地震波干渉法を利用した地下構造探査の手法を確立し、数値シミュレーションおよびフィールドデータへの適用例を示している。地震波干渉法においては、合成反射波記録は設置した受振点数だけ存在し、これらに対して反射法地震探査処理を施すことで、地下構造のイメージングが可能である。いくつかの現実的な探査条件を設定したシミュレーションスタディを行い、震源と受振器の関係に対応した合成波形記録とイメージング結果の特徴について明らかにした。また、以下のようなフィールドデータへの適用事例とともに本手法の有効性を示した。

(1) 立坑掘削のための単一の発破震動を地表の受振器群で観測した記録から立坑周辺のイメージングを行った。発破時刻の不明な震動観測記録に対して地震波干渉法を適用して受振点の数だけのショット記録を合成後、重合およびマイグレーション処理を施し、堆積層と基礎岩盤との境界を示す地層境界のイメージングを行った。その結果は同一側線上の反射法地震探査の結果と整合的であり、単一の震源を利用する場合にも、本手法により地下構造イメージングが可能であることが示された。

(2) 地震波干渉法の適用性評価のため、理論的環境を再現できる山岳地帯において現場実験を行った。山を貫通するトンネルを震源の移動経路として利用し、トンネル内部から発する打撃型震源およびトラック走行による震動を地表に設置した受振器群で観測した。また、震源の配置に制約のある地下調査を想定し、同一の調査地域において疎らに存在する地表の発破震源から震動を観測した。これらの記録に対して地震波干渉法を適用し山体のイメージングを行った結果、調査地域の単傾斜する地質性状および反射法地震探査の結果に対応するイメージング結果を得た。これらの結果は、地中からの雑信号の受動的観測記録から地下構造調査の可能性を示すものであり、また、震源や受振点の配置に制約のある場合にも本手法が有効であることを示しており、都市部や住宅地、災害地等における地下調査に役立つものである。

(3) 高密度に配置された受振器群による余震観測記録から本手法による地下構造探査を実施した結果、同一測線での反射法地震探査と同様の地下構造イメージングができた。また利用する余震観測記録の数が増えると震源分布が広がり、波形記録合成に利用できる波動の伝播経路が多様化するためにS/N比が向上して地下構造のイメージング結果が良好になることを確認した。地中に存在する自然の震源からの震動を利用した探査であり、地震の多発する日本において自然地震の観測記録から地下のイメージングを可能にする地震波干渉法が今後有効である。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、特性曲線法による高精度弾性波動シミュレーション手法の研究開発と、地震波干渉法による地下構造探査の高度化のための研究と手法開発を目的としたものである。得られた結果の概要は以下の通りである。

- ① 特性曲線法による波動場モデリングにおいて、一階波動方程式を数値的に解くために必要な差分スキームについて、安定性および数値分散性の比較検討を行った結果、本研究で採用したCIP法は他の差分スキームに比べて数値分散の少ない安定した計算のできることを明らかにした。
- ② 弾性体中の運動を記述する運動方程式と応力歪み関係式から、弾性波の各成分について前進波および後退波に対する一階波動方程式を導き、弾性波動に対する特性曲線法の定式化を行った。また、境界の外側に仮想的な波動場を導入することで自由表面と液体-固体境界に代表される各種境界条件を設定し、特性曲線法による現実的な波動場モデリングを可能とした。
- ③ 各種の数値シミュレーションを実施した結果、従来広く用いられた手法では数値分散が生じるような厳しい条件下や速度コントラストの大きなランダム不均質モデルにおいても安定した計算ができ、開発されたシミュレーション手法が有効であることが示された。
- ④ 新しいデータ処理技術の一つである地震波干渉法およびその理論を利用した地下構造探査について種々のシミュレーションスタディを行い、観測波形の相互相関によるグリーン関数合成において、停留位相が重要な役割を果たしておりこの概念は探査計画に役立つことを示した。また、現実的な探査条件の数値計算を実施し本手法による地下構造探査の

ための手法を確立した。

- ⑤ フィールドデータを用いて地下構造をイメージングし、地震波干渉法の有効性を示した。対象とした地盤震動は、地中及び地表に偏在するパルス型震源、地中（トンネル内）を移動する打撃型震源およびトラック走行震動、余震観測記録である。その結果、本手法の有効性ととも、震源受振点配置に制約を受ける探査やモニタリング調査など今後幅広い分野での活躍の可能性を示した。

以上、本論文は、CIP法を差分スキームに採用した特性曲線法により高精度な弾性波動シミュレーション手法を開発し、地震波干渉法による地下構造探査の実用化を実現したものであり、今後、石油・天然ガスの探鉱技術の開発、土木・環境・防災のための地下調査技術の進展に多大に貢献することが期待され、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年1月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。