

学 位 論 文 題 名

走時トモグラフィーにおける速度構造の
メッシュの自己最適化

学位論文内容の要旨

本論文は、地震波走時トモグラフィ手法の改良として、モデル構造におけるグリッドを波線の分布に合わせて自動的に適切な位置へ配置する手法を提案する。データセットに対して、より適切性の高い逆問題をデザインすることで、より詳細な地下構造のイメージを得るのが目的である。

従来は、その多くが規則的なグリッドの配置によって速度構造が表現されていたが、本手法では、不規則なグリッド配置を用いる。まず、グリッド配置の最適化問題ではグリッド配置が不規則であっても、各グリッドの支配域の形状のバランスが保たれていることが重要である。したがって、構造の表現にはどのようなグリッド配置からでも最適な要素分割が得られるデローネ四面体分割を採用した。そして、デローネ分割の構築法として技術的難易度の高い「頂点逐次添加法」を採用した。この方法はデローネ分割の条件を満たしつつ、任意の位置にグリッドを追加できる。すなわち、四面体の頂点位置における地震波速度をパラメーターとして、全体の再構成を行わずに、一個からのパラメーターを追加できる。このことによって、構造の逐次的細分化と逆問題を交互に行う自己最適化戦略が可能となる。この戦略は、これまで他の構造表現方法に対しては提案されていた。主な利点は、構造全体を試行錯誤的に何度も再構成するよりも計算量が少ないことである。今回、デローネ四面体分割に対してこの戦略を用いるのは初めての試みである。一般に、走時トモグラフィーにおけるパラメーター配置の自由度および適切性の高さと、その導出に必要な計算時間の間にはトレードオフがある。本手法はそのトレードオフの妥協点を見出したものといえる。そして、以下の事についても開発あるいは適用を行った。

1. 全域的なパラメーター配置の適切性を評価する定量的規準値の適用
2. パラメーター追加位置の判定方法の開発
3. 従来のロバストな波線追跡法の四面体分割への拡張法の開発

(1)については、比較的少ない計算量($O(N)$)で導出できる規準値がすでに Curtis and Snieder(1997)によって提案されている。以下、この規準値を Θ と呼ぶ。(2)については、まず、パラメーター(頂点グリッド)追加位置を四面体の重心とすることで、追加位置判定問題を四面体の順位付け問題とする。順位判定の規準は互いに異なる方向性をもつ二つの規準を交互に用いる。ひとつは、試行的に追加した際の Θ の変化を評価することによる基準である。この基準は波線同士の交差性を重視する方向性をもっており、「頂点逐次添加法」がトモグラフィーに内部的に組み込まれたことで初めて可能となった。もう一つは、波線の交差性の検出能力は無く、波線密度とグリッド密度の空間的分布が一致することを

重視する方向性をもつ既存の基準である。(3)については、ネットワーク最短経路問題を応用した手法を用いた。これはすでに規則的なグリッドモデルに対しては提案されていたが、本研究により、不規則四面体分割されたモデルについても十分に適用できることが明らかになった。

以上のことを採り入れた総合手法を用いて仮想構造モデルによる数値実験を行った。結果における Θ の値は、同一の構造に従来の手法を用いた場合よりも高い値を示した。したがって、本手法は、従来の規則的なグリッドモデルの欠点であった、波線の分布に対するグリッドの過不足を調整し、適切な位置にグリッドが配置された解を導くことができるといえる。また、結果がグリッド追加位置の判定方法に対して非常に敏感であることも明らかになった。今回提案する二つの基準の交互使用は単独での使用よりも適切性が高い結果を導くことが分かった。このことは、 Θ を最大に改善する位置への追加が効果を発揮するには、全体のコンディションが捉えられている必要があり、そのためには補助的な追加が必要であると解釈できる。したがって、この点に着目し、より良い判定基準を考案することが今後の課題である。

学位論文審査の要旨

主査	教授	岡田	弘
副査	教授	笠原	稔
副査	教授	小山	順二
副査	教授	蓬田	清

学位論文題名

走時トモグラフィーにおける速度構造の メッシュの自己最適化

博士学位論文審査等の結果について（報告）

三次元地下構造探査の課題は、古くからの固体地球科学の基本的な課題である。計算機が用いられるようになってからは、その多くは立方体メッシュで表現したモデル構造を仮定し、インバージョン手法により残差最小とモデル構造再現数値実験による評価を原理として解析されてきた。

しかし、地震探査法では観測点が主として地表に限定されることなどから、どうしても偏った分布の波線データを用いたトモグラフィとなりがちである。波線が関心ある地下深部をまんべんなく通過する理想的なデータセットが得られる環境はまず考えられない。このような波線偏在という観測データのもつ不可避免的な限界をどのように評価し、走時データから最も信頼できる走時異常の 3 次元分布を求めればよいのか、という根本問題に果敢に挑戦した研究のひとつが本研究である。

震源と観測点の 3 次元的な偏在故に、データの質に基づいた最も信頼できる解を得るためには、波線の偏在をはじめから考慮したメッシュ構造を構築することから始めるべきである。本論文では、四面体による不規則のメッシュ構造を、自己最適化の手法で構築し、波線データの質に適合した構造解析を行い、既存の手法による結果と比較し、開発した手法の優位さを検証したものである。

本論文では、地震波走時トモグラフィ手法の改良として、グリッドを波線の偏在分布に合わせて自動的に適切な位置へ配置する手法を提案している。その結果、より適切性の高い逆問題がデザインされたことになり、より詳細で信頼性の高い地下構造のイメージを得ることができる。

従来は規則的なグリッドの配置によって速度構造が表現されていたが、本手法では不規則なグリッド配置を用いている。グリッド配置の最適化問題では、グリッド配置が不規則

であっても、各グリッドの支配域の形状のバランスが保たれていることが重要である。

したがって、構造の表現にはどのようなグリッド配置からでも最適な要素分割が得られるデローネ四面体分割が採用された。そして、デローネ分割の構築法として技術的難易度の高い「頂点逐次添加法」を採用した。この方法はデローネ分割の条件を満たしつつ、任意の位置に四面体の頂点を追加する手法である。すなわち、四面体の頂点位置における地震波速度をパラメーターとして、全体の再構成を行わずに、一個からのパラメーターを追加できる。このことによって、構造の逐次的細分化と逆問題を交互に行う自己最適化戦略が可能となった。

この戦略は、これまで他の構造表現方法に対しては提案されていた。主な利点は、構造全体を試行錯誤的に何度も再構成するよりも計算量が少ないことである。今回、デローネ四面体分割に対してこの戦略を用いるのは初めての試みである。一般に、走時トモグラフィにおけるパラメーター配置の自由度および適切性と、その算出に必要な計算時間の間にはトレードオフがある。本手法はそのトレードオフの妥協点を見出したといえる。

全域的なパラメーター配置の適切性を評価する定量的規準値の適用については、比較的少ない計算量で導出できる規準値がすでに提案されている。パラメーター追加位置の判定方法については、まず、パラメーター(頂点)追加位置を四面体の重心とすることで、追加位置判定問題を四面体の順位付け問題とする。順位判定の規準は互いに異なる方向性をもつ二つの規準を交互に用いた。ひとつは、試行的に追加した際の基準値の変化を調べる方法である。これは波線同士の交差性を重視する評価となっており、「頂点逐次添加法」がトモグラフィに内部的に組み込まれたことで初めて可能となったといえる。もう一つの評価基準は、波線密度とグリッド密度が一致することだけを重視する既存の基準であり波線の交差性の検出能力は無い。

従来のロバストな波線追跡法の四面体分割への拡張法の開発については、ネットワーク最短経路問題を応用した手法を用いた。これはすでに規則的なグリッドモデルに対しては提案されていたが、本研究により、不規則四面体分割されたモデルについても十分に適用できることが明らかになった。

以上のことを採り入れた総合手法を用いて仮想構造モデルによる数値実験を行った結果、基準値は従来の手法を用いた場合に比べ高い値を示した。したがって、本手法は、従来の規則的なグリッドモデルの欠点であった、波線の分布に対するグリッドの過不足を調整し、適切な位置にグリッドが配置された解を導くことを可能にしたといえる。また、結果がグリッド追加位置の判定方法に対して非常に敏感であることも明らかになった。今回提案する二つの評価基準の交互使用は、それぞれ単独での使用よりも適切性が高い結果を導くことが数値実験で確かめられた。今後この点に着目し、より良い評価規準が得られる応用問題を広く吟味することが今後の課題である。

これを要するに、著者は、地震波トモグラフィについて媒質分割の自己最適化手法の開発に関する新知見を得たものであり、今後地下構造の解明において物理探査で基礎的貢献をなすところ大なるものがある。

よって著者は、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。