博士（理　学）　齋　藤　秀　樹

学位論文題名

Seismic Traveltime Tomography for Shallow Subsurface Explorations

（浅部地下探査を目的とした地震波走時トモグラフィ）

学位論文内容の要旨

本研究の目的は、浅部地下探査のために実用的な地震波走時トモグラフィ手法を確立することにある。本論文では、この目的を達成するために行った要素技術の研究成果を系統的にまとめた。

地震波走時トモグラフィは、探査対象とする地下断面の周囲に多数の起振点と受振点を配置し、それらの間を伝播する人工地震波の初動走時データから、断面内の地震波速度分布を再構成する技術である。初動走時は、初動となる波の伝播経路沿いのスローネス（速度の逆数）の積分値であるので、波線経路がわかれば初動走時から速度分布を求めるのは容易である。しかしながら、波線経路は求めるべき速度分布に依存するため、問題が非線形になる。これを解決するために、繰り返し計算の中でそのつど線形化する方法を採用した。繰り返し計算は、速度モデルに対する初動走時ならびに波線経路のモデリングと、この波線経路を使って線形化した方程式を解いてモデルの修正量を求める計算を交互に実行するものである。

このうち、モデリング部分は非常に重要であり、本研究全体の成否を決定づけるものであるため、論文の最初で詳細に考察した。従来の方法は、特に速度コントラストが大きい場合に、初動となる波（特に臨界屈折波）の経路を確実には求められないことや、計算時間が非常にかかることなどから、トモグラフィを実用化するには問題があった。そこで本研究では、トモグラフィに適したモデリング法として、ホイヘンスの原理を離散化したアルゴリズムを開発した。この計算手法は、初動となる波を確実に計算できること、実用上十分な計算精度を持つこと、計算時間が速度分布に依存しないこと、任意の起振点受振点位置について計算できることなど、トモグラフィに適した手法であるばかりでなく、3次元への拡張や異方性媒質への適用が容易であることも示した。

再構成アルゴリズムは、多くの研究者により研究がなされてきており、本研究の中では新たなアルゴリズム研究は行っていない。ただし、実データへの適用にあたっては種々の問題があったため、その解決に工夫を要した。

まず、トモグラフィのデータ取得時に用いられる典型的なジオメトリのひとつであるクロスホール測定において、初動走時曲線の特徴を調べ、複数の走時曲線が持つべき幾何学的関係を明らかにした。この検討にあたっては、地表屈折法地震探査の走時曲線がもつべき性質を参考にするとともに、上記のホイヘンスの原理にもとづくモデリングを利用した。本研究成果は、トモグラフィ解析の入力データとしての初動走時曲線をチェックし調整するうえで、きわめて有益な法則であることがわかった。

次に、トモグラフィの再構成像上にしばしば現れるアーティファクト（偽像）について調べた。アーテファクトの発生は種々の原因によるが、発生原因別にアーティファクトの特徴や、その軽減方法を明らかにした。アーティファクトは、観測ジオメトリの制限がある場合、速度コントラストが大きい場合、データ数の割にパラメータ数が多すぎる場合などに発生することが分かったため、探査計画立案の際にこれらを考慮することで、その軽減を図ることができることを示した。また、3次元構造の影響を受けたデータや速度異方性を有する地盤に対して、上記の2次元等方性トモグラフィを適用すると、特有のアーティファクトが発生することも示した。この種のアーティファクトの軽減は、地盤のモデル化を含めた本質的な問題であるため、最後の章に示した3次元トモグラフィや異方性トモグラフィの項で詳細に検討し、解決を図った。

以上の技術を組み合わせることで、実際のフィールドデータの解析を精度よく行うことが可能となった。これまでに多くのフィールドデータに適用した中から、本論文では、測定ジオメトリの異なる4種の事例を取り上げた。従来の探査手法では得られなかった、高精度かつ高分解能な速度分布の解析が可能になった。

最後に、トモグラフィ技術の今後の動向を示すとともに、新たな試みとして、3次元トモグラフィ、異方性トモグラフィ、S波速度トモグラフィについて、開発した解析アルゴリズムを示すとともに、実際の現場データへの適用事例を示した。

3次元構造を有する地盤に対して2次元トモグラフィを適用すると、3次元の影響がアーティファクトとして現れることを示した。3次元トモグラフィは、ホイヘンスの原理に基づく初動モデリング法を3次元に拡張するとともに、再構成アルゴリズムも3次元化することで実現した。数値モデルならびに実データへの適用事例をあげ有効性を示したが、ジオメトリの制限が大きく、その解決がまだ十分ではないことも明らかとなった。

異方性を有する地盤に対して通常の等方性トモグラフィを適用すると、特有のアーティファクトが発生することが、フィールドデータの解析から明らかとなった。本研究においては、異方性を有する地層ごとに観測データから異方性の程度を見積もり、その影響を除去する解析法を考案した。この方法は、簡単な座標変換によって異方性媒質を等価な等方性媒質に置き換え、これに対して通常の等方性トモグラフィを適用した後、トモグラムを元の座標に戻すもので、異方性に起因するアーティファクトを大幅に軽減できることがわかった。

特に土質地盤（未固結堆積層）においては、地盤の力学的強度変形特性を調べるうえで、S波速度の利用が有効であることが知られている。 そこで、単一ボーリング孔での速度検層に利用されているSH波震源装置を用い、S波速度の再構成を試みた。解析結果は、他の地盤調査結果と整合し、本手法の有効性が示された。

本研究では、目標とした浅部地下構造についての実用的なトモグラフィ手法の確立をほぼ達成することができた。また、トモグラフィ技術の今後の方向性を示すとともに、その試行的な成果をあげることができた。今後の研究課題としては、さらに複雑な速度分布への適用を進めるとともに、透過波だけでなく反射波の走時も用いることでジオメトリの改善を図ることなどが考えられる。また、走時のみではなく振幅情報や波の到来方向なども利用し、より多くの地盤情報の抽出を目指すべきである。さらに、S波速度やその異方性などを再構成するために、ボーリング孔中で使用可能な実用的な震源装置をはじめとする実用的な探査装置の研究も重要である。

以上

学位論文審査の要旨

主　査　　教　授　　蓬　田　　清

副　査　　教　授　　小　山　順　二

副　査　　教　授　　西　田　泰　典

副　査　　助教授　　笹　谷　　努

副　査　　助教授　　松　岡　俊　文（京都大学大学院工学研究科）

学位論文題名

Seismic Traveltime Tomography for Shallow Subsurface Explorations

（浅部地下探査を目的とした地震波走時トモグラフィ）

地震波トモグラフィに関する研究は、すでに10年以上も前から行われているが、とくに地下浅部の探査を目的とした系統的な研究は少なく、実データに適用し浅部地下構造を解明するための、真に実用的な手法の発展が望まれる状況にあった。

本論文は、このような状況にあった地震波走時トモグラフィについて、実用的手法の確立を目標とし、モデリングおよびインバージョン技術について実例を中心とした研究成果について述べたものである。

浅部地下探査を目的としたトモグラフィの実用化において、初動モデリング技術は非常に重要であり、本研究全体の成否を決定づけるものであった。従来、主として地震学分野で開発されてきた方法は、特に速度コントラストが大きい場合に、初動となる波（特に臨界屈折波）の経路を確実には求められないことから、トモグラフィを実用化するうえでは問題があった。著者は、トモグラフィに適したモデリング法として、ホイヘンスの原理を離散化したアルゴリズムを開発した。この計算手法は、初動となる波を確実に計算できること、実用上十分な計算精度を持つこと、計算時間が速度分布に依存しないこと、任意の起振点受振点位置について計算できることなど、トモグラフィに適した手法であるばかりでなく、３次元への拡張や異方性媒質への適用が容易である点で評価できる。

著者は、トモグラフィの実データへの適用にあたって、種々の問題点を解決する工夫を施している。

まず、トモグラフィのデータ取得時に用いられる典型的なジオメトリのひとつであるクロスホール測定において、初動走時曲線の特徴を調べ、複数の走時曲線が持つべき幾何学的法則を明らかにした。トモグラフィ解析の入力データとしての初動走時曲線をチェックし調整するうえで、きわめて有益な法則を発見したことが評価できる。

次に、トモグラフィの再構成像上にしばしば現れるアーティファクト（偽像）につい

て調べ、その特徴や軽減方法を明らかにした。この研究成果は、実際の探査を成功に導く鍵となる探査計画を立案するうえで有益なものである。

著者が開発した以上の技術により、実際のフィールドデータの解析を精度よく行うことが可能となった。多くのフィールドデータに適用した中から、本論文では、測定ジオメトリの異なる４種の事例について述べられた。従来の地震探査手法を超える、高精度かつ高分解能な速度分布の解析が可能になった点が評価できる。

最後に、トモグラフィ技術の今後の動向を示すとともに、新たな試みとして、３次元トモグラフィ、異方性トモグラフィ、Ｓ波速度トモグラフィについて、著者が独自に開発した解析アルゴリズムを示すとともに、実際の現場データへの適用事例が述べられた。

３次元トモグラフィは、ホイヘンスの原理に基づく初動モデリング法を３次元に拡張するとともに、再構成アルゴリズムも３次元化することで実現した。数値モデルならびに実データへの適用事例をとおして、実現可能性を示すとともにその難しさも明らかにした点が評価できる。

異方性を有する地盤に関しては、速度とともに異方性パラメータをも未知数とする解析法が研究されているが、実際の地盤への適用には限界があり、必ずしも実用的とはいえない状況にあった。著者は、異方性を有する地層ごとに観測データから異方性の程度を見積もり、その影響を除去する解析法を考案した。この方法は、簡単な座標変換によって異方性媒質を等価な等方性媒質に置き換えるもので、地盤が異方性を有する場合にも、速度構造を正確に再構成するうえで有効な手法であると評価できる。

Ｓ波速度トモグラフィは、とくに未固結堆積層の力学的変形特性を調べる目的で、主として地盤工学分野で望まれている技術であるが、測定の困難さから実施例がほとんどない状況にあった。著者は既存の測定器の組み合わせによって孔間Ｓ波測定を実施し、Ｓ波速度トモグラフィを実現した。地表の地震動に影響を与える表層地盤のＳ波速度分布を２次元的に求める探査を実現したことは評価できる。

本論文では、目標とした実用的な地震波走時トモグラフィ手法の確立をほぼ達成したうえ、トモグラフィ技術の今後の方向性を示すとともに、その試行的な成果をあげたことが評価できる。

これを要するに、著者は、地震波走時トモグラフィについて、実用上の新知見を得たものであり、浅部地下探査に関して地球物理学ならびに地質工学に貢献する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。