

氏 名	よこ 横 田 とし 俊 ゆき 之
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3925 号
学位授与の日付	平 成 19 年 1 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	弾性波トモグラフィ解析の高精度化およびその適用に関する研究

論文調査委員	(主 査) 教 授 芦 田 讓	教 授 松 岡 俊 文	教 授 大 津 宏 康
--------	--------------------	-------------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、弾性波トモグラフィの観測技術および逆解析を中心とした解析技術に関する研究開発を行い、弾性波トモグラフィの分解能向上および解析の安定性の維持を論じた結果をまとめたものであって、8章からなっている。

第1章は緒論であり、弾性波トモグラフィの概説を行うと共に、弾性波トモグラフィの抱える問題提起を行っている。

第2章では、弾性波トモグラフィのデータ取得に関する技術を、観測ジオメトリ、坑井内震源、坑井内受振器の項目ごとにまとめている。続いて、機械式打撃機構を持った坑井内震源の開発を行っている。完成した坑井内震源は、(1)操作が容易でかつ発震間隔が短い、(2)石油探査に利用可能な発震エネルギーを持つ（炭酸塩岩油層で600 m 程度の到達距離）、(3)最大適用深度3000 m（水压 30MPa）、温度 150℃ で使用可能、(4)商用電源（100V, 700W）で駆動できる、などの利点を持ち、実用的であることを確認している。

第3章では、弾性波トモグラフィ解析の基礎となる、逆解析技術について説明し、安定なトモグラフィ解析について考察を行っている。続いて、弾性波トモグラフィ解析を実データに適用する際の問題点について、数値実験の手法を用いて検討し、以下の結論を導いている。

- (1) 坑井間に存在する縦型の速度異常を検出するためには、縦型速度異常を通過する波線と通過しない波線の両方のデータを取得すべきである。その場合、極低速度表層（風化層）の存在はトモグラフィ解析結果に悪影響を与えるため、屈折法などの補完データを用いて、その影響を取り除く処理（風化層除去処理）を行う必要がある。
- (2) 平滑化制約付き最小二乗法は、微細構造検出と安定した逆解析の両立を可能とする手法である。また、平滑化の度合いについて、情報量基準 ABIC を最小化することにより客観的に決定できることも、この手法の利点である。
- (3) 3 次元的観測配置で取得されたトモグラフィデータを従来のように、2 次元平面上に投影して2次元トモグラフィ解析を行うことは誤差が大きい。そのような場合に、地下構造は2次元で、震源は3次元の2.5次元トモグラフィ解析が有効である。

第4章では、安定で効率的な周波数—空間領域のフルウェーブ・トモグラフィ解析手法について述べている。具体的には、各反復計算では一つの周波数成分のみを使用し、低周波数から高周波数まで周波数成分を漸増させていく手法を提案している。なお、各反復ステップで使用する周波数成分の選択基準を工夫し、解析の効率化を実現するとともに、3つの高速度異常体を持つ単純な速度モデルにおいては、わずか10個の周波数成分（実部と虚部を考えると、20データ）を用いることで3つの異常体を再構成できることを示している。

第5章では、地震断層探査への弾性波トモグラフィの適用性について検討するために、丹那断層近傍で初動走時トモグラフィを実施した結果について述べおり、以下の結論を得ている。

- (1) 丹那断層を横切るトモグラフィ解析断面では、断層を横切らない断面に比較して、速度構造の水平方向の連続性が乏しい。
- (2) 丹那断層やその近傍の断裂群に起因する水平方向の速度不連続がイメージングされた。

(3) それら速度不連続帯を結んだ線は、ほぼ垂直であり、丹那断層もしくはその付随断層がとらえられた。

第6章では、大分県湯坪地域と鹿児島県大霧地熱地域二つの地熱地域への弾性波トモグラフィの適用を行い、以下の結論を得ている。

(1) 大分県湯坪地域の例では信頼度および分解能ともに高いP波速度・S波速度トモグラムが作成された。P波速度・S波速度トモグラムは大局的に類似し、両者から想定される地質境界、断層分布もほぼ同一であり、実験フィールドの地質構造が良く把握された。両トモグラムの分解能および信頼性は同程度である。信頼性解析の結果から、解析領域内に40 m程度の規模を持つ速度異常があった場合にはそれをほぼ適切に再構成できる。領域中央部では、20 m程度の速度異常を検出可能である。

(2) 鹿児島県大霧地域の例では、観測配置が3次元であるため、2.5次元トモグラフィ解析を適用し、投影誤差を含まない速度トモグラムの再構成を試みた。しかしながら、信頼性解析の結果、取得されたデータ密度が決定的に不足しており、得られたトモグラムの信頼区間は2本の坑井のごく近傍のみに限定され、特に銀湯断層の予想走行位置付近についてはほとんど再構成されない上に、両坑井の近傍においても、地下イメージが歪んでいる可能性が高い。

第7章では、繰り返し弾性波トモグラフィの、流体（ガス・水）圧入 EOR モニタリングへの適用性について、炭酸塩岩油層実油田の現実的な速度モデルを構築し、数値実験より評価した。EOE モニタリングに適した解析手法の開発により、速度変化が5 %程度生じるガス圧入に関しては精度の高い解析結果を得ている。一方、速度変化が0.5%未満の水圧入に関しては十分に精度の高い解析結果を得ることができていない。

孔隙内流体組成変化が生じた領域を推定する手法の開発により、圧入流体の貯留層内移動を可視化することが可能となり、多分野の専門からなる研究グループ内の議論を行う際に有効な結果を提示している。

第8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、弾性波トモグラフィの精度および分解能の向上とその実用化を図るため、坑井内震源開発を中心とした観測技術および逆解析を中心とした解析技術に関する研究を実施し、それらの成果を現場データに適用し、その有効性を検証した結果をまとめたもので、その主な成果は以下の通りである。

- (1) 分解能の向上と解析の安定性の両面を考慮した、走時トモグラフィ解析法の開発を行うと共に、走時トモグラフィより理論的に高分解能であるフルウェーブ・トモグラフィ解析を導入し、安定かつ効率的な解析手法の開発を行った。
- (2) 弾性波トモグラフィデータから、より多くの情報を抽出するという観点から、偏向フィルタを用いたSV波抽出を行い、S波速度トモグラフィ解析を実施した。また、フルウェーブ・トモグラフィは、P波速度・S波速度・密度等多くの地下物性値を導出することができ、流体挙動の把握など詳細な地下構造解釈に貢献することを示した。
- (3) 活断層地域や地熱開発地域の現場データから詳細で高分解能な速度構造を解析し、坑井データを利用して、その解析結果の妥当性を検証した。それぞれの分野の調査目的に合わせて地下構造を解釈し、既存地質情報との整合性より、弾性波トモグラフィの有効性を確認した。

以上要するに、本論文は弾性波トモグラフィ技術の高精度化のための解析技術を開発するとともに、地下構造の分解能を、実際の現場データの解析で要求される程度まで向上させる解析技術の開発を行った成果を述べたものである。その結果、石油・天然ガス・メタンハイドレート・地熱などの資源探査分野、EOE・地熱流体挙動・メタンハイドレート生産モニタリング・CO₂ 地下貯留モニタリング等の資源・環境部門でのモニタリング分野、大規模建造物の基礎調査、ダムの長期モニタリング等土木・防災分野への弾性波トモグラフィの適用機会の増大に貢献するとともに、高精度な地下構造解釈を実現したものであり、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18年12月13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。