京都大学	博士 (工学)	氏名	李嘉杭 (LI JIAHANG)
論文題目	Research on the Application of the Full Waveform Inversion Method for Estimating Underground Structures from Seismic Waves in Exploration (地震波動から地下構造を推定する探査における全波形インバージョン手法適用の研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>地下の資源・エネルギーを効率良く探査することや、地下に圧入した二酸化炭素の挙動を正確にモニタリングするには、高精度・高解像度な地下可視化手法が必要となる。1980年代に提案された全波形逆解析手法は、得られた地震波形全てを利用して地下速度構造を推定する手法であり、その解像力の高さから大きな注目を集めた。その後の計算機の大規模化・高速化に伴い、2000年以降に多くの研究成果が公表されるようになった。一方、データ取得時に混入する種々のノイズや観測データの欠損(ミスショットなど)に対する逆解析結果の不安定性から、資源・エネルギー探査を対象とした全波形逆解析の実データへの適用は限られたものであった。そこで、この問題を解決し、全波形逆解析手法をより実用化へと近づけるため、本論文では(1) sparse relaxed regularized regression (SR3)法の適用による空間エイリアシングやデータ欠損を補う手法、(2) K-support ノルムの導入によるノイズの影響を低減する手法、(3) randomized singular value decomposition (rSVD)法による速度更新量の低ランク近似を利用した逆解析結果の安定化手法の適用を提案した。提案手法の有効性を多くの数値実験により検証し、人工的に加えられた様々なノイズの影響下でも安定で精度良く地下速度構造の推定が可能であることを示した。本論文は、以下の6章から構成されている。</p> <p>第1章は序論である。資源・エネルギー探査の分野における全波形逆解析手法の発展の経緯や近年の動向、実用化における問題点について過去の文献を整理しつつ述べた上で、本研究で提案されるSR3、K-support ノルム、rSVDの各手法による解析精度や解の安定性向上手法の位置付けについて概観した。</p> <p>第2章では、粗い空間サンプリング間隔による空間エイリアシングや観測データの欠損に起因する誤差の問題を解決するため、取得データに対してSR3法を適用することを試みた。空間エイリアシングが及ぼす逆解析への悪影響について均質モデルを用いて説明した後、2004 BPモデル、SEG/EAGE Overthrustモデルを用いた数値実験により提案手法の優位性について検証した。その際、人工データにランダムノイズやデータ欠損によるノイズを加えることで、実データへの適用で想定される様々な問題に対する提案手法の頑健性をテストした。得られた逆解析結果を従来法(Tikhonov 正則化法による全波形逆解析)による結果と比較し、誤差がより早く収束すること、特に深部においてより高精度な結果が得られることを示した。</p> <p>第3章では、観測データに含まれるノイズの影響を低減するため、K-support ノルムの導入を提案した。L1 ノルム、L2 ノルムの特徴やそれらを組み合わせたK-support ノルムの特徴を説明し、パラメータ空間における誤差関数の凸性やスパース性について説明し、提案手法によりどのようにノイズの影響が低減されるかを示した。提案手法をMarmousi IIモデル、2004 BPモデル、SEG/EAGE Overthrustモデルを用いた数値実験に適用し、K-support ノルムを用いた全波形逆解析の有効性の検証を行った。ランダムノイズやコヒーレンスノイズの影響下でも、従来法に比べてより高精度に地下速度構造を推定できることが確認された。</p>			

京都大学	博士(工学)	氏名	李嘉杭 (LI JIAHANG)
<p>第4章では、観測データに含まれるノイズの影響を受けることなく地下の特徴的な構造を抽出するため、rSVD法による速度更新量の低ランク近似手法の適用を提案した。低ランク近似により特徴的な構造が抽出できるコンセプトやrSVDを導入する利点について説明した後、2004 BPモデルを用いた数値実験により提案手法の有用性を検証した。人工データに誤差を混入させると、従来法では逆解析された速度構造内に実際には存在しない速度場の振動が見られた。一方、速度更新量の低ランク近似によりこの振動が抑制され、結果として地下を高精度に可視化できることが示された。特に、周囲との速度コントラストが大きい岩塩ドームの境界がより明瞭に捉えられるようになることが確認され、地下の特徴的な構造抽出に提案手法が有効であることが示された。また、解析周波数を徐々に変えて逆解析結果が局所解に陥ることを避ける「マルチスケール逆解析」とも相性が良いことが確認されており、これまで発展してきた全波形逆解析手法の枠組みを利用しつつ、それをさらに高精度化・頑健化できる可能性が示された。</p> <p>第5章では、これまで得られた結果に基づいた全波形逆解析手法の実データに対する適用性について、全波形逆解析において問題となる計算コストの問題点との関連についても指摘しながら議論した。さらに、近年注目を集めている機械学習・深層学習を利用した波動場の計算法と本研究の関連性についても議論した。本論文の成果により、全波形逆解析で問題となっていたノイズの混入による脆弱性の低減の可能性が示されたことで、今後、実データへの適用がより現実的になると考えられる。これにより、今後の資源・エネルギー探査や二酸化炭素地中貯留モニタリングなどの分野での地下可視化性能が大幅に改善される可能性が示され、本研究が我が国の資源・エネルギー・地球環境問題の解決に資することが期待される。</p> <p>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。</p>			

氏名

李嘉杭(LI JIAHANG)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、資源・エネルギー探査において研究が進められている全波形逆解析手法を実用化するために必要となる解析手法の高度化を目的として実施されたものである。ノイズ混入やデータ欠損などによる推定速度構造の劣化を防ぎ、解析精度の向上を目指し、全波形逆解析手法の実用化に資することを目的とした研究である。得られた成果は以下の3つに要約される。

1. 観測データに欠損が存在する場合や空間エイリアシングによる精度の低下が見られる場合、sparse relaxed regularized regression法を適用することにより全波形逆解析結果の精度を向上できる可能性があることを数値実験により検証した。従来法と提案手法による結果を比較したところ、特に深部の速度構造が精度良く推定できることが示された。
2. 全波形逆解析の誤差に広く利用されているL2ノルムに代わり、K-supportノルムを適用することを新たに提案した。これにより、解のスパース性や誤差関数の凸性が確保され、ノイズ影響下においても精度良く地下速度構造を推定できることが期待される。数値実験による検証では、Marmousi IIモデル、2004 BPモデル、SEG/EAGE Overthrustモデルといった物理探査分野で広く使用されるベンチマークモデルに対して提案手法を適用し、従来法による結果と比較し、提案手法による推定の優位性を示した。
3. randomized singular value decomposition法を適用し速度更新量の低ランク近似を行うことで、ノイズの影響下でも精度良く地下の特徴的な構造を抽出することができることを示した。この手法の適用により、大きな速度コントラストを有する地下の構造をより明瞭に捉えられることが可能となった。

以上のように、速度構造推定精度向上のために統計学、情報科学、画像解析などの各種手法を全波形逆解析法に導入し、測定データの情報を十分に抽出できる逆解析手法を確立した。更に、物理探査分野で標準のベンチマークモデルを用い、従来手法よりも精度良くベンチマークモデルを再現できることを示した。提案の手法が全波形逆解析の実用化に極めて有効であることを示した。本論文は、当該地球物理学分野および物理探査分野において、学術上、実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、令和6年6月26日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。