

氏 名	しば 芝	よし 良	あき 昭
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)		
学 位 記 番 号	論 理 博 第 1447 号		
学位授与の日付	平 成 16 年 5 月 24 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	Study on rupture process by waveform inversion using simulated annealing and simulation of broadband ground motions (焼きなまし法を用いた波形インバージョンによる震源過程の解明と広帯域強震動シミュレーションに関する研究)		
論文調査委員	(主 査) 教 授 入 倉 孝 次 郎	教 授 竹 本 修 三	助教授 松 波 孝 治

論 文 内 容 の 要 旨

本研究は強震動予測の精度向上を目的として、震源における 1 Hz 以上の高周波地震動の生成領域を強震記録から直接推定するための波形インバージョン手法を開発し、実地震への適用を試みている。高周波地震動の励起特性の解明は、震源の物理的な破壊過程を知るうえでも、また地震災害の軽減を目的とした構造物や地盤の耐震研究にとっても重要である。

周波数 5 Hz までの高周波数成分を含む地震記録を扱うことのできる波形インバージョン手法として、申請者は発見的 (ヒューリスティック) 手法の一種である焼きなまし法と、高周波地震動の合成に優れた経験的グリーン関数法を組み合わせたアルゴリズムを提案した。焼きなまし法は、多くの局所的な最小解を持つような非線形問題において、大域的な最適解を探索する際に有効な手法とされる。本研究では焼きなまし法の改良版であり、連続変数を扱うことができ、かつ収束がより早いとされる VFSA (Very Fast Simulated Annealing) を採用した。焼きなまし法では、解探索の自由度を規定する温度と呼ばれるパラメータを変化させることにより、解の収束を図っている。本研究ではさらに、探索が大域的な最適解の近傍に到達したことを示す臨界温度という指標を導入した。臨界温度において温度の冷却過程は停止し、一定の採択確率で解の探索が繰り返される。この過程で採択された解の集合は、ベイズ的推論の立場からは観測値を説明するモデルパラメータの周辺事後確率分布に相当する。この関係を用いることにより、提案手法はモデルパラメータの推定分解能を定量的に提示することが可能となる。

本手法の震源インバージョン問題への適用の可能性を確かめるため、震源断層に地震モーメント、ライズタイム、応力降下などの分布を想定して合成された合成記録を用いて、これらのパラメータの逆推定を行った結果、その有効性が検証された。また遺伝的アルゴリズムをはじめとする他のヒューリスティック手法との性能比較の結果、VFSA を採用した提案手法は同一の探索回数で最も誤差の小さい解に到達することがわかり、本手法の優位性が明らかになった。

実地震への適用事例として、1997年伊豆半島東方沖地震 (Mj5.9) における震源近傍の岩盤上強震記録に対して本手法が適用された。観測記録を変位波形と速度波形に変換し、それぞれに波形に対し異なるパラメータを用いてインバージョンが行われた。変位波形について長周期成分に敏感な地震モーメントとライズタイム、および破壊到達時刻をモデルパラメータとし、また速度波形について短周期に敏感な実効応力、および地震モーメントと破壊到達時刻をモデルパラメータとして探索が実施された。その結果、変位波形から推定された地震モーメント解放量の分布と、速度波形から推定された実効応力の空間分布が概ね一致することがわかった。これは従来のフォワードモデリングによる強震動評価と整合性のある結果である。また変位と速度波形に加え、加速度波形と加速度包絡波形を目的関数としたインバージョンを試み、速度波形を単独に用いたインバージョン結果とほぼ同様の実効応力分布が得られることがわかった。

最後に、インバージョンにより得られた実効応力と地震モーメントの空間分布に基づいて震源の特性化を実施し、周波数 10 Hz までの広帯域地震動シミュレーションを通して特性化手法の妥当性を検討した。その結果、高周波成分が特に卓越する一部の観測点において観測記録が過小評価されたものの、他の地点では概ね良く観測記録が再現されることがわかった。

論文審査の結果の要旨

本研究は、震源における高周波地震動の生成過程を解明するため、高周波地震記録の位相情報まで含めた波形インバージョンのための手法を提案している。震源で励起された高周波地震動は、伝播経路の媒質の不均質性による散乱などにより擾乱を受けやすく、決定論的に高精度のグリーン関数の評価が困難なため、震源情報を引き出すための波形インバージョンは低周波地震動しか有効でないと考えられてきた。このことは、断層破壊の動力学的解明に限界をもたらし、また地震災害軽減のための強震動の決定論的な評価を困難にしている。

その解決法の1つとして、経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンが試みられているが、多数の局所解が存在するなど従来の最尤法に基づく方法では克服困難な問題があり精度良いインバージョン法は未だ確立されてはいなかった。本研究はこのような条件下において大域的な最適解を推定するためのアルゴリズムとしてヒューリスティック（発見的）手法の1つである焼きなまし法を採用することで、高周波地震動の生成過程解明の困難さを克服する新たな波形インバージョン方法を提案している。

焼きなまし法ははじめに暑く熱し徐々に冷ますことにより安定な結晶構造を作ることができる物理過程を模擬して最適解を導くもので、温度を一定条件でゆっくり冷ませば最適解に到達することが保証されている（Geman and Geman, 1984）。提案された手法の有効性がアスペリティを有する不均質震源モデルを想定し経験的グリーン関数を用いて合成された記録から震源パラメータを推定するため動作テストにより検証されている。本研究が採用した焼きなまし法の改良版であるVFSA（Very Fast Simulated Annealing）は、従来の焼きなまし法や遺伝的アルゴリズムなど他のヒューリスティック手法と比較して、より誤差の小さいモデルパラメータを探索することができる優位性をもつことを明らかにしている。また臨界温度というアルゴリズムの制御パラメータを導入し、この温度に到達した後に探索されたモデルパラメータのヒストグラムを作成することにより、探索パラメータの最適値のみならずその分解能や信頼性を定量的に図示することで本手法の有効性が顕著に示されている。これらの情報は得られた探索結果の妥当性を評価する上で極めて有効となっており、新規性ある方法である。

1997年伊豆半島東方沖地震に対して同手法を適用した結果、震源断層上でモーメントを大きく解放した領域と、実効応力の高い領域はおおむね重なることを明らかにした。ここでの結果は、地震モーメントと実効応力を個別に探索したことにより得られたものであり、広帯域の強震動予測を目的とした震源モデルを構築する際において重要な知見となる。

また速度波形インバージョンから得られた実効応力と地震モーメントの分布、さらに変位インバージョン結果としての地震モーメント分布の情報を総合的に採り入れた震源の特性化の手続きを示し、広帯域強震動シミュレーションによりその妥当性を検証している。

開発されたインバージョン手法は、高周波地震動の評価手法として有用であり、今後、より大規模な地震に適用されることにより、高周波地震動の発生源の詳細な特性がこれまで以上に明確にされることが期待できる。

以上の理由により、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。