

氏名	ねもとひろお 根本泰雄
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	理博第2118号
学位授与の日付	平成11年7月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科地球惑星科学専攻
学位論文題目	Estimation of the rupture zone from the aftershock distribution immediately after the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) Earthquake using heuristic search (発見的探索を用いた1995年兵庫県南部地震直後の余震分布と本震破壊域の推定)

論文調査委員 (主査) 教授 入倉孝次郎 教授 尾池和夫 教授 竹本修三

論文内容の要旨

大地震の直後数分間・数時間に発生する余震の震源分布は、大地震の破壊メカニズムの解明に極めて重要な情報である。しかしながら、予想されていない領域に大地震が発生した場合、偏った観測点分布、少ない観測点数、不正確な地震波速度構造等のため、精度良い余震分布の決定が一般に困難である。1995年兵庫県南部地震では、本震発生時及び本震直後には震源域周辺のおよそ $100 \times 100 \text{ km}^2$ の範囲で観測点が19点しかなく、かつその配置に偏りが存在したため、本震および本震直後の余震の震源位置について高精度(誤差数100 m)の推定は未だなされていない。本研究は、このような劣悪な条件において余震の震源位置の高精度推定を目的として、震源と地震波速度構造モデルの同時インバージョン方法の開発を行った。本論文は2部からなる。第1部は1995年兵庫県南部地震(気象庁マグニチュード7.2)直後の余震の震源位置を地震波伝播媒質の速度構造との同時インバージョンにより推定した。ここでは媒質の速度構造は平行多層と仮定し、インバージョン方法は疎なメッシュの盲目的探索法と発見的探索法のビームサーチ法のハイブリッド手法を採用している。第2部は第1部で得られた1次元速度構造モデルを初期モデルとして3次元速度構造と本震および余震の震源の同時インバージョンを発見的探索法の山登り法を用いて行った。本研究は、これらの解析により高精度で推定された余震分布および地下構造モデルを基に、本震破壊域の範囲および余震の拡大過程に関する議論を行った。

第1部では、1次元地震波速度構造と余震の震源位置との同時推定のため、計算値と観測値の最小二乗誤差(r. m. s. 誤差)と各観測点への地震波到着の時間差(到着時差)の2つの異なる情報を用い、最小メッセージ長規準(MMLC)を評価規準として、モデルの妥当性を吟味する手法を開発した。ここで導入したMMLC評価規準は震源決定インバージョンへの初めでの適用である。従来の評価規準としては、r. m. s. 誤差規準、ロバスト推定法に基づく評価規準、経験的評価規準などがあるが、これらの評価規準ではモデルで説明出来ない地震データを扱う方法に問題があった。すなわち、さまざまな種類のモデルを仮定した場合に、真のモデルの推定に有効な地震データを除外してモデルの評価を行う可能性があるからである。申請論文では、「到着時差」を情報として加えモデルで説明出来ない地震のデータも除外することなくそのモデルの妥当性を評価する新しい考えを導入した。この「到着時差」は、解析対象とする全ての地震に対して、対象とする震源領域と観測点領域とを設定し、地震波が最初に到達する観測点を基準として、他の観測点との到着時間の差をヒストグラムに表したものである。理論的計算からこのグラフがパスカル分布で近似出来ることがわかった。それにより、観測と理論曲線のフィッティングから地震波速度構造の揺らぎ、減衰構造の揺らぎ、観測点毎のS/N比の違いを読みとることが出来ることを示した。モデルで説明出来ない地震の評価には、このパスカル分布に基づく出現確率を適用した。モデルで説明出来る地震が多いかどうかをモデルの評価基準に取り入れるような、探索領域における固有の評価関数(ヒューリスティクス)を与えることで、

有望なモデルを優先して探索していく発見的探索法を用い、地震波速度構造モデルの探索を効率よく行う手法も開発した。この方法は、発見的探索を行う前段階としてメッシュを荒くとした盲目的探索を行うことで初期モデルを必要としない、発見的探索のなかのビーム探索法を採用することにより局所解に陥りにくい、特徴を持つ。MMLC 評価基準の導入と探索方法の工夫で、計算時間が少ないが精度の高い1次元地震波速度構造と震源との同時推定が可能となった。推定された本震直後の余震分布は北東端で枝分かれしており、有馬高槻構造性(ATL)には届いていないこと、本震直後からクラスター状の分布をしていること、深さ分布が約5-18 km であること、神戸側では少しづつ北東に向かって浅くなる傾向があること、などが明らかとなった。この結果、本震破壊域は、本震震源から北東方向に約35 km、南西方向に約20 km であることが判った。

第2部では、第1部で得られた1次元地震波速度構造モデルを初期モデルとして3次元地震波速度構造と震源との同時推定を行っている。伝播媒質の3次元地震波速度モデルを求めることで本震震源と余震分布がより高精度で推定できる。第1部で用いた「到着時差」を基にして得られた地震波速度の変動可能性・減衰をヒューリスティクスに加え、発見的探索の中でも探索空間が節約出来る山登り法を採用している。3次元地震波速度構造モデルの探索では、モデルで説明出来ない地震は原理的に存在しないことになるので、ここでの評価基準は最小二乗残差(r. m. s.)を用いる。この方法で推定された本震震源と本震直後の余震分布は第1部で1次元地震波速度構造モデルを用いた時の震源位置の誤差範囲に収まった。本震震源は気象庁や京都大学防災研究所が発表している位置と比較して有意に東、あるいは北東方向に1-2 km ずれ、深さも1-2 km 浅いことを指摘した。震源の精度は水平方向に約100 m、上下に約200 m となっている。本震の破壊開始点が200 m 以下の精度で決定されたことは重要である。また、解析対象領域の地震波速度の特徴として、阿武山観測網周辺は余震分布域周辺と比べてP波速度が速いことが判明した。「到着時差」をあらゆる方向から検討することで、トモグラフィーと同じように3次元地震波速度構造モデルを計算できる可能性も示すことも出来た。

論文審査の結果の要旨

申請論文は、1995年兵庫県南部地震の本震および余震の走時記録を用いて地震波速度構造と震源との同時推定を行い、詳細な本震震源位置と本震直後の余震分布を求め、その結果から本震破壊域の推定を行っている。本論文の成果として、震源位置と地震波速度構造の同時インバージョンに関する方法論と開発された手法により推定された余震分布および地殻の速度構造の2つがあげられる。前者の手法としての有効性および後者の得られた結果そのものの地震学上の意義が審査の対象となる。主論文は2部で構成されている。第1部は、発見的探索の中のビーム探索法を用い、最小メッセージ長評価規準(MMLC)を評価規準として、1次元地震波速度構造と震源との同時インバージョンにより、本震直後の余震分布の推定を行っている。この結果を基に本震の破壊域および余震域の拡大過程に関する議論がなされている。第2部は発見的探索の中の山登り法を用い、3次元地震波速度構造と震源との同時インバージョンにより、本震の震源位置と本震直後の余震の震源分布のより高精度の推定を行っている。結果として3次元地震波速度構造モデルも研究成果の1つとして得られている。

第1部では、仮定した速度構造モデルに対する地震波到来の計算値と観測値の最小二乗残差に加え、各観測点に到着する時間差(到着時差)を地震波速度構造に関する有効な情報であることを明らかにすることにより、震源と速度構造の同時インバージョン手法を開発している。モデルで説明出来ない地震データも除外することなく「到着時差」分布に基づく出現確率をモデルの評価に導入したこと、および評価規準として最小メッセージ長基準(MMLC)の有効性を確認したことは、申請者のオリジナルな考えによる。また、地震波速度構造と震源との同時推定に対して、発見的探索の中でもビーム探索法を導入することで局所解を回避し、その前段階としてメッシュの荒い盲目的探索も行うことで初期モデルを必要としない、独自の手法で安定な解を導くことに成功している。その結果、本震直後の余震分布が詳細に求まり、本震破壊域は本震震源から北東方向に約35 km、南西方向に約20 km であり、有馬高槻構造線には届いていないこと、北東端では破壊域が2つに分岐していること、など地震学的に極めて興味ある事実を明らかにしている。

第2部では第1部で得られた1次元地震波速度構造モデルを初期モデルにし、「到着時差」から得られたモデルの探索領域における固有の評価関数を加え、発見的探索のなかでも探索時間の早い山登り法を用いることで3次元地震波速度構造と震源との同時推定を行っている。方法論としてはオーソドックスなものであるが、大量の未知なパラメータのため計算時間が膨大でこれまで成功しなかった問題を探索方法の工夫で成功させたことは申請者のオリジナルの1つである。その結果、本震震源は他機関が発表した位置とは有意にずれていること、余震分布は1次元地震波速度構造モデルを用いた時の誤差範囲

に収まること、を明らかにしたのは地震学への重要な貢献と考えられる。また、「到着時差」をあらゆる方向から作成して計算に用いることで、トモグラフィーと同じように3次元地震波速度構造モデルを推定出来る可能性を示したことは、重要な成果といえる。

よって、本論文は、博士（理学）の学位論文として価値があるものと認めた。