

論文審査の結果の要旨

氏名 松原 誠

1997 年以来、日本列島においては多面的・学際的な地震学的観測・実験が行われ、“島弧”として日本列島の地殻・上部マントル構造の解明を目指した研究が行われている。1997-1998 年に行われた東北日本弧における観測・実験は、上記のプロジェクトの最初であり、日本海溝から東北日本弧を経て日本海にいたる大規模海陸屈折・広角反射法地震探査とともに、東北脊梁山地における反射法地震探査、高密度自然地震観測が実施された。これら 3 つの観測は様々な波長の島弧不均質構造解明のために密接な連携のもとに行われた。高密度自然地震観測は東北脊梁山地周辺に展開されたものであり、地震探査では明らかにすることができない地殻内 3 次元的不均質構造の解明のために計画されたものである。この脊梁山地は東西圧縮場にあり、その両側には活断層が発達している。特に、その西麓の千屋・川舟断層系は、1896 年陸羽地震の震源断層として知られている。

本論文は、この高密度自然地震観測データの inversion 解析から、過去の研究では明らかにされていなかった短波長の不均質構造（波長にして 20km 程度）を扱ったものである。このような目的を達成するために、過去に開発された inversion 法をそのまま適用するのではなく、データの持つ解像力を最大限に引出し、高分解能の構造を求めるトモグラフィ法を考案・開発した。本研究においては、先に述べた地震探査データ及びその結果との対比がなされており、上記プロジェクトの利点が活用されている。

本論文第 1 章は“緒言”であり、自然地震データを用いた地殻構造推定方法のレビューがその問題的とともに簡潔に議論されている。さらに、本論文の動機付け及び実験・観測及び研究を進めるにあたっての戦略が述べられている。

第 2 章は東北日本弧のテクトニクスに関する記述である。これまでの探査や観測によって得られた東北日本弧の構造、地震活動、重力異常の特徴などが簡潔にまとめられている。

第 3 章は、観測・実験の詳しい記述、特に高密度自然地震観測の仕様やデータについての詳しい説明がある。このような高密度自然地震観測を実施・維持するには多くの人力が必要であり、また得られるデータは膨大なものである。松原氏はこの観測に立ち上げ当初から参加し、その遂行に多大の貢献をした。

第 4 章はデータ処理に関する記述である。松原氏は、この処理についても中心的な役割を果たし、解析用の膨大なデータセット（波形データ・読み取り走時データ）を作り上げた。この作業は、地味であり、かつ膨大な時間を必要とするものである。このようなプロセスから信頼性の高い良質のデータを作成したことは、本論文の重要な成果として評価したい。

第 5 章は、データの inversion 解析方法についての記述にあてられており、本論文の重

要な柱である。より波長の短い不均質構造モデルと得るためには、そのモデルを記述するためのグリッドをなるべく細かくとることが望ましい。しかし、単純にグリッド数を増やした場合、未知数が増えて inversion は所謂”underdetermined case”となってしまう。この事態を回避する目的で、従来は観測法的に初期値情報を付加した”damped least squares 法”が用いられてきた。本研究では、不均質構造をモデリングするより妥当な方法として、各グリッドの速度についてその近傍のグリッドの速度との間で相関を持たすという方法を考案した。即ち、本 inversion における未知パラメータを震源座標及び各グリッドの slowness とし、観測データの分散、slowness の分散・共分散、相関距離(L_c)を与え、最尤法を用いて解を求める。通常の inversion 解析では、観測方程式に対応する行列に対し、その逆行列を求める必要がある。しかし、データ量が多い自然地震の解析の場合、逆行列を直接的に求めることは難しい。この難点を回避するため、本研究では LSQR 法を用いることとした。

第 6 章は、この方法を実際に適用する下準備としての数値実験について述べられている。不均質構造の波長(L_h)に対して、グリッド間隔(L_g)及び相関距離(L_c)をどのように設定するかを考慮する必要がある。本論文ではこの設定に関わる数値実験が入念に行われている。即ち、 L_h を仮定し、どのような L_g 及び L_c を設定した場合にモデルが最も良く再現されるかを調べた。その結果、 $L_g < (1/4) L_h$ 、 $L_c < (1/8) L_h$ という関係が満たされている場合、仮定したモデルの再現性がよいことが確かめられた。

第 7 章では、実際の東北脊梁山地におけるデータ解析について記述されている。先に述べた高密度地震観測から、706 個の自然地震と 50 個の人工地震（発破）が選ばれた。これらの地震に対応する走時データは、P 波で 33,993、S 波で 18,483 である。尚、本研究で用いた観測網の密度は、場所によって大きく異なる。このような事情に即して、本研究で開発した inversion のプログラムでは、観測点密度に応じたグリッド配置が可能である。更に、実際の観測点配置に基づいて模擬データを作成し、得られる解の解像度を調べた (checker board test)。その結果では、本研究で得られる解は、上部地殻については 20-60km の波長の構造までは十分な信頼度があると確認された。

大局的に見ると、地殻最浅部では北上低地帯、横手盆地、秋田平野、仙北平野等の堆積層が厚く分布している領域、栗駒山などの火山付近で低速度となっている。また、その下の上部地殻においては、脊梁山地から西側の領域が低速度であり、北上山地下は高速度となっている。これらの結果は、この自然地震観測とほぼ同時に行われた地震探査の結果と大局的にはよく一致している。断層に挟まれた領域に着目すると、千屋・川舟断層の表層では P 波速度が 10%ほど遅く、且つその下には、東西 7-15km、南北 18km 程度の P 波の低速度領域が発見された。また、この領域では、東傾斜の構造が卓越している。

第 8 章は、“議論”であり、本論文で得られた結果を他の結果と比較検討し、その妥当性や地球科学的意味付けについて述べられている。本論文の結果は、より広範囲のデータを用いた他のインバージョン結果と、大局的に一致している。本研究では、より短波長

の不均質構造が鮮明となった。

浅部の低速度領域は、キューリー一点温度分布やカルデラの位置と調和的であり、周囲に比べて高温であると考えられる。冒頭に述べたように、脊梁山地を挟む断層については、反射法地震探査による断層面が得られている。本論文で得られたイメージ（低速度体）は、脊梁山西麓から東に入り込む千屋断層の形状と矛盾しない。また、この低速度域は、MT法から求められた低比抵抗領域と調和的である。本研究で得られた地震学的情報から考えると、この部分の速度低下は岩石のメルトではなく、流体（水）に起因している可能性が高い。即ち、本研究で求められた P 波及び S 波の速度構造から推定すると、1-8%の流体（水）が存在している可能性がある。また、自然地震分布と不均質構造を比較すると、地震は高速度域及び高速度域と低速度域の境界で発生しており、低速度域内における活動は殆どないことがわかった。

第 9 章は、本論文の全体にわたるまとめが、簡潔な形で述べられている。

以上述べたように、本論文は、1997-1998 年に行われた東北日本で実施された高密度自然地震観測から得られたデータを詳細に解析することによって、東北脊梁山地下の 3 次元的不均質構造をこれまでになく詳細に求めた。この解析にあたり、自然地震データの *inversion* 法を新たに考案した。この方法によって、過去の研究では得られなかった新しいイメージが得られた。即ち、脊梁山地西側に発達している千屋断層と調和的である。また、脊梁山地下に顕著な低速度領域が発達している。この部分は、MT 法で求められた低比抵抗体とよい一致を示し、低速度の原因として 1-8%の流体（水）であることを指摘した。

このように、松原氏が高密度自然地震観測で果たした役割の重要性（大量な生データの処理、波形・走時データの構築）、開発した *inversion* 解析方法の独自性、得られた結果の重要性から、本論文は学位論文としての水準を満たしている。また、本論文の第 3, 5 及び 7 章は平田直氏との共同研究であるが、論文提出者である松原氏が主体となってデータの *processing*・解析を行ったもので、同氏の寄与が十分であると判断する。

従って、博士（理学）の学位を授与できるものと認める。