

学 位 論 文 題 名

Three dimensional crustal heterogeneity revealed by magnetotelluric method and its role for the generation of intraplate earthquakes

(Magnetotelluric 法により明らかにされた地殻の三次元不均質と
その内陸地震発生に対する役割)

学位論文内容の要旨

近年、地震波速度構造や比抵抗構造等により明らかにされた地殻強度の不均質が、局地的な応力集中を引き起こし、地殻内の浅部地震（内陸地震）の発生要因になると考えられるようになってきた。例えば、新潟-神戸歪集中帯 (Sagiya *et al.*, 2000) では、下部地殻に存在する地殻流体が地殻強度を局地的に弱められていることが地震発生の原因と考えられている (例えば Iio *et al.*, 2002)。しかしながら、特に比抵抗構造においては、このような不均質構造の解明は二次元構造解析によるものが主であり、歪集中帯の平面的な構造の不均質性は明らかにされていないことが多い。今後、内陸地震発生帯の中でどのような場所が強い地震が起きるか等の問題を議論するにあたって、三次元的な不均質性の解明が必須となる。したがって本研究では、二つの内陸地震震源域（北海道東部弟子屈地域および 2004 年留萌支庁南部の地震 (M 6.1) の震源域）において広帯域 MT 観測を行い、三次元比抵抗構造の解明を試みた。次に、これらの三次元的な構造不均質がどのように地震発生と関わるかについて考察した。また、比抵抗構造解析の有力な手法であるマグネトテルリック法には、異常位相と呼ばれる問題が存在する。異常位相は構造の三次元性が強い地域に出現しやすい傾向があることから、その解明は三次元比抵抗構造の解明において不可避である。このため、本研究では異常位相問題を実際のデータを基に検討した。

2004 年留萌支庁南部の地震 (M 6.1) 震源域はオホーツクプレートとアムールプレートの境界部と考えられており (Takahashi *et al.*, 1999)、2004 年の地震は東西圧縮応力の下での逆断層型である。留萌地域ではまず、二次元インバージョン手法によって震源域の北端、中央および南側を横切る三測線における比抵抗断面を得た。これらによると、留萌地域の地下はおおよそ 4 km 以浅に分布する低比抵抗層 (<10 ohm-m) と、より深部の高比抵抗層 (約 100 ohm-m) の 2 層から構成される。掘削抗から得られたデータ (石油公団、1986) との対応により、上部の低比抵抗層は白亜紀および第三紀の堆積岩類、下部の高比抵抗層はそれ以前の基盤岩類を表している。特徴的な構造として、2004 年地震の震源直上に、高比抵抗域 (基盤岩) と低比抵抗域 (堆積層) との境界面が局所的に浅くなる領域が発見された。この領域は表層地質に見られる背斜構造と整合的であることから、背斜構造が震源近くまで存在することを示している。ここで、坑内検層から推定されるヤング率は低比抵抗層 (堆積層) で 24.0 GPa、高比抵抗層 (基盤岩類) で 52.1 GPa と見積もられる。背斜構造の存在はこの大きな力学的性質の不均質が震源付近に存在することを意味する。このような不均質構造周辺では、広域応力によって歪の集中が発生することが知られている (e.g. Chatterjee and Mukhopadhyay, 2002)。

したがって、2004 年地震は背斜構造付近の歪集中によって発生したと考えられる。

三次元モデル計算を用いるフォワード解析によって得られた比抵抗モデルによると、二次元解析による背斜構造を支持する構造が示唆された。また、余震域とほぼ同範囲に低比抵抗層と高比抵抗層の境界面がドーム状に盛り上がる領域が見られた。この領域の存在は、高重力異常の分布（本多ほか、2007）からも指摘されており信頼性は高い。このことは、2004 年地震が三次元的な不均質構造により発生したことを示唆する。

北海道東部弟子屈地域は千島前弧スリバーの北縁部および阿寒—知床火山列の内部に位置しており、1938 年および 1959-1967 年に M5 以上の左横ずれ型地震が 9 回以上発生している。広帯域 MT 観測の結果、屈斜路カルデラ周辺域において長周期側長周期側に 90 度を超える位相が観測された。一・二次元解析法において 90 度を超える位相を説明するのはほぼ不可能であり、二次元解析手法を主とする解析手法でこれらのデータを取り扱うことは困難であった。一方、異常位相は三次元比抵抗構造モデルで説明が可能であることが示されている（例えば Egbert, 1990）。しかしながら、これらのモデルは複雑な形状を持ち、現実の比抵抗構造に適應するのは難しいと思われる。これに対し、本研究では比較的単純な（現実的な）形状を持つ、“凸型コンダクターモデル”によって異常位相の説明が可能であることを明らかにした。凸型コンダクターモデルは、広域の長細いコンダクターとそれに接続するローカルなコンダクターから構成され、ローカルコンダクターの端部に異常位相域が出現する。このモデルを基にして三次元フォワード比抵抗モデリングを行ったところ、異常位相は屈斜路カルデラ下の厚さ 4 km におよぶ明瞭なコンダクターによって出現していることが明らかとなった。また、異常位相によってこれまで構造が明らかとなっていなかったカルデラ南方の震源域には、高比抵抗相（1000 ohm-m）が存在することが明らかとなった。なおこのモデルは、異常位相を含めほぼ全て帯域での非対角成分のインピーダンスを説明している。また、このモデルはインダクションベクトルおよび異常位相域における対角成分のインピーダンスも説明している。

屈斜路カルデラ南方の高比抵抗領域は、表層地質・密度構造（市原ほか、2006b）との対応から中新世の安山岩類を表していると考えられる。また、カルデラ下に存在する低比抵抗体は、密度構造より明らかにされたカルデラ充填堆積物の分布域と対応している。1938 年地震の断層は、この両地域の境界、すなわちカルデラ壁に対応する。したがって、地震がカルデラ壁という物質境界を断層として使用して発生したか、地震断層がカルデラの形成に深く関わっていることが考察される。なお、この構造は AMT 観測を基にした断層周辺の詳細な二次元比抵抗インバージョン解析および電気探査によっても支持されている。

1959 年、1967 年地震の余震域は、屈斜路カルデラ南方の高比抵抗域に分布する。この領域は安山岩類に対応することから、力学的に“強い”性質を持つと考えられる。一方、この領域に接する屈斜路カルデラでは、厚い堆積層が分布し、さらにカルデラ下にはマグマ供給が推定されていることから、延性的な性質を持つと考えられる。したがって、1959、1967 年地震は、明瞭な力学的性質のコントラストを持つ領域の“強い”側に発生したことになる。また、高比抵抗体は走向方向で分布深度が変化する、三次元性の高い形状を示す。したがって、この地域でも三次元的な構造不均質が地震発生に影響したことが推測される。

以上述べたように、本研究では、北海道内の内陸地震発生地域に置いてマグネトテルリク法による比抵抗構造探査を行い、地震発生を左右する 3 次元的な地下構造の不均質性をあきらかにした上で、その形成に係わるテクトニックな背景についても考察した。また、マグネトテルリク法による構造解析上困難な問題であった、特殊な構造により生じる異常な位相についても、それを説明する構造を提案し、それを実際の構造解析に適用した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 茂 木 透
副 査 教 授 池 田 隆 司
副 査 准教授 橋 本 武 志
副 査 准教授 高 橋 浩 晃

学 位 論 文 題 名

Three dimensional crustal heterogeneity revealed by magnetotelluric method and its role for the generation of intraplate earthquakes

(Magnetotelluric 法により明らかにされた地殻の三次元不均質と
その内陸地震発生に対する役割)

近年、地震波速度構造や比抵抗構造等により明らかにされた地殻強度の不均質が、局地的な応力集中を引き起こし、地殻内の内陸地震の発生要因になると考えられるようになってきた。Magnetotelluric 法（以下、MT 法）による比抵抗構造探査は、このような不均質構造の検出に有用であり、内陸地震発生地域の特徴を明らかにする方法として用いられてきた。しかし、これまでは二次元構造を前提とした解析が行われていたために、このような不均質は震源域を横切る二次元的な構造による議論に限られ、三次元的な構造の不均質性についてはほとんど明らかにされていない。しかし、最近、断層の走向方向の不均質が地震発生条件やその規模に大きな影響があることが指摘され、3 次元的な構造不均質を求めることが重要な課題となっている。

本論文は、北海道内の二つの内陸大地震発生地域である、2004 年留萌支庁南部地震（M6.1）震源域および道東・弟子屈地域（1959～1967 年に M5 以上の地震が 9 回発生した。）を対象として、広帯域 MT 法による観測を行い、それら地域の三次元比抵抗構造を明らかにするとともに、三次元的な構造不均質がどのように地震発生と関わっているかについて議論した結果をまとめたものである。特に、弟子屈地域においては、MT 観測データに異常な位相が現れたが、それを説明できる特殊な三次元比抵抗構造についても議論を行い、現実的な比抵抗構造に適用可能なモデルを見出すことに成功した。

2004 年留萌支庁南部地震（M 6.1）地域の研究においては、本震の震源直上には、基盤層が局所的に浅くなる特徴的な構造が見出され、これにより生じる構造の不均質が地震発生に関係が深いことを指摘した。また、低比抵抗層と高比抵抗層との間には大きな強度の差があることが明らかになり、震源付近ではこのような力学的性質の不均質により、広域応力によって歪が集中した可能性があることが示された。また、三次元フォワード解析によって 3 次元比抵抗構造を構築し

た結果、地震発生に大きな影響があった背斜に伴う不均質構造の広がりを示し、さらに、余震域とほぼ同じ範囲に基盤岩層がドーム状に盛り上がる領域が明らかにされた。

北海道東部弟子屈地域の研究では、MT 法で得られた長周期側のデータに 90 度を超える異常なインピーダンス位相が観測された。このような異常位相を説明する三次元比抵抗構造モデルは、これまでもいくつかの提案があったが、これらのモデルは複雑な形状を持ち、現実の比抵抗構造に適応することは難しかった。これに対し、本研究では比較的単純な形状を持つ“凸型コンダクターモデル”が、一定の条件を満たすときに異常位相が現れることを発見した。これを制約条件として三次元フォワード比抵抗モデリングを行った結果、背弧側の低比抵抗構造から屈斜路カルデラ下に凸型に張り出した低比抵抗構造が得られ、また、カルデラ南方の震源域には、高比抵抗構造が存在することも明らかとなった。さらに、1938 年屈斜路地震を引き起こした断層は、この両地域の境界にありカルデラの形成に係わるものであることも示し、一方、1959 年～1967 年にかけて発生した大地震の震源域は、屈斜路カルデラ南方の三次元的形状をもつ高比抵抗構造中に分布しており、周辺部と比べて緻密で強度の大きい岩体に応力が集中して地震を発生させた可能性のあることも示した。

以上述べたように、本研究では、北海道内の内陸地震発生地域において MT 法により三次元比抵抗構造を示し、内陸大地震の発生には三次元的な地下構造の不均質性が強く関わっていることを明らかにした。また、三次元的な特殊な構造によりしばしば生じる異常位相問題について、現実的な構造でも一定の条件の下ではそれが生じることを発見し、その条件により構造に有力な制約が与えられることも示し、実際の構造解析に取り込むことに成功した。このような研究成果は、内陸大地震の発生地域の特徴に新しい見解を与えたものであり、また、比抵抗構造解析法にも顕著な進展をもたらしており、地球電磁気学および地震学の発展に大きな貢献をするものである。よって、著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格があると認める、