

| | |
|---------|---|
| 氏名・(本籍) | おお ぞの ま こ 大 園 真 子 |
| 学位の種類 | 博 士(理 学) |
| 学位記番号 | 理博第2620号 |
| 学位授与年月日 | 平成23年3月25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 | 東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻 |
| 学位論文題目 | 測地データに基づく奥羽脊梁山脈ひずみ集中帯周辺の変形過程 |
| 論文審査委員 | (主査) 教授 三 浦 哲 教授 藤 本 博 己, 佐 藤 春 夫 教授 吉 田 武 義(地学専攻) 准教授 岡 田 知 己 |

論 文 目 次

| | |
|------------------------------------|-----|
| 謝辞 | i |
| 概要 | iii |
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 測地データによる粘性構造の推定 | 1 |
| 1.2 東北日本のテクトニクスおよび奥羽脊梁山脈ひずみ集中帯 | 2 |
| 1.3 2008年岩手・宮城内陸地震 | 3 |
| 1.4 余効変動の主要因と内陸地震の余効変動 | 4 |
| 1.5 2008年岩手・宮城内陸地震の余効変動 | 5 |
| 1.6 本研究の目的と本論文の構成 | 5 |
| 第2章 GPS 観測および日座標値推定 | 12 |
| 2.1 GPS 観測網 | 12 |
| 2.2 日座標値の推定方法 | 13 |
| 2.3 国土地理院による日座標値推定結果との比較 | 13 |
| 2.4 高時間分解能の座標値推定の試み | 14 |
| 第3章 東北地方の定常地殻変動 | 24 |
| 3.1 はじめに | 24 |
| 3.2 GPS 観測点における変位速度場の推定 | 24 |
| 3.3 東北地方の定常地殻変動速度場 | 25 |
| 3.4 2008年岩手・宮城内陸地震の震源域周辺の定常地殻変動速度場 | 26 |
| 3.5 本章のまとめ | 26 |
| 第4章 2008年岩手・宮城内陸地震にともなう余効変動の検出 | 42 |
| 4.1 はじめに | 42 |

| | | |
|---------------------|-----------------------------|-----|
| 4.2 | 余効変動の特徴 | 42 |
| 4.2.1 | 時系列 | 42 |
| 4.2.2 | 余効変動の時空間変化 | 43 |
| 4.3 | 余効変動の要因について | 43 |
| 4.4 | 本章のまとめ | 44 |
| 第5章 粘弾性構造の推定 | | 52 |
| 5.1 | はじめに | 52 |
| 5.2 | 粘弾性緩和モデルの推定方法 | 52 |
| 5.3 | 結果 | 54 |
| 5.3.1 | 最適モデルによる粘弾性緩和にともなう余効変動の空間分布 | 54 |
| 5.3.2 | 観測時系列との比較 | 56 |
| 5.4 | 本章のまとめ | 56 |
| 第6章 議論・考察 | | 84 |
| 6.1 | はじめに | 84 |
| 6.2 | 粘弾性構造パラメターの信頼性について | 84 |
| 6.3 | 粘弾性構造の妥当性について | 85 |
| 6.3.1 | 弾性層の厚さ | 86 |
| 6.3.2 | 粘性係数 | 86 |
| 6.4 | 残差時系列の要因について | 87 |
| 6.4.1 | 不均質構造の影響 | 87 |
| 6.4.2 | 局所的余効変動 | 88 |
| 第7章 結論 | | 105 |
| 参考文献 | | 107 |

論文内容要旨

測地観測は、地表変形を mm の精度で直接観測できることから現在の固体地球科学において不可欠なツールである。長期間にわたって観測される地殻の変形過程からは地下の粘弾性構造を推定することも可能であり、地震波トモグラフィなどと共に地球の構造を知るための重要な情報源となる。これまでに行われた研究により、世界各地において氷河・氷床融解に伴う荷重減少や、地震発生に伴う断層運動などに起因する、地下の応力変化に対する粘弾性応答から生じる地表変形を観測し、地殻あるいはリソスフェアに相当する弾性層の厚さや、それ以深の粘弾性層の粘性係数、さらにその深さ方向の変化などが推定されている。

本研究の研究対象領域である東北日本は、太平洋プレートと北米（オホーツク）プレートの収束による東西短縮が顕著であり、地震間の固着や地震時すべり、余効変動などひずみの蓄積・解放過程に関する多くの研究が行われている。一方、島弧に沿う奥羽脊梁山脈には、東西短縮速度が周辺よりも大きい「ひずみ集中帯」が存在する。このひずみ集中帯に沿って逆断層型の内陸活断層が発達しており、蓄積されたひずみを解放すべく、1896年陸羽地震（M7.2）などの内陸大地震が発生している。2008年岩手・宮城内陸

地震 (M_j7.2) も同様の内陸地震であった。

ひずみ集中帯周辺の粘弾性構造を知ることは、内陸活断層周辺の地震発生に関連するひずみ蓄積過程を理解する上で非常に重要である。奥羽脊梁山脈ひずみ集中帯では、1896年陸羽地震後の約70年間に実施された水準測量に基づく余効変動データから東北日本下の粘弾性構造が議論され、地殻に対応する弾性層の厚さを30 km、その下層の粘弾性層の粘性係数を 10^{18} - 10^{20} Pa·s と仮定すると、観測値が説明できることが報告されている。一方、近年の地球物理学的観測結果を総合して、この地域で発生する内陸地震の発生過程について定性的なモデルが提唱されている。それによると、奥羽脊梁山脈直下では、地震発生層が周辺よりも薄く、マントルウェッジ内に存在する流体の上昇流により、下部地殻以深が低粘性化している可能性が示唆されている。従って、後者のモデルについては3次元的な粘弾性構造が想定されていることになる。

これらの先行研究の結果に基づき、本研究では、まず、東北日本で観測されている測地データから、奥羽脊梁山脈ひずみ集中帯周辺の詳細な地殻変動を明らかにする。次に、2008年岩手・宮城内陸地震後に観測されている長期・広域の余効変動を説明するための粘弾性構造モデルの構築を試みる。現在の稠密かつ高精度の測地データを利用することにより、ひずみ集中帯周辺の詳細な地殻変動が得られ、本研究で推定される粘弾性構造と先行研究の結果を比較することで、新たな解釈が可能になると期待できる。以下では、各章の概要を述べる。

第1章では、粘弾性構造推定に関する先行研究、東北日本および奥羽脊梁山脈ひずみ集中帯のテクトニクス、2008年岩手・宮城内陸地震の概要、大地震後に観測される余効変動の要因についてまとめ、本研究の目的および本論文の構成について述べる。

第2章では、GPS (Global Positioning System) 観測の概要および座標値推定方法について紹介する。東北日本に設置されている約240点のGPS観測点について、相対測位法を用いて日座標値を求める。国土地理院が公開している日座標値の最終解析解との比較を行い、本研究で実施するGPSデータ解析結果の品質について議論を行っている。

第3章では、大地震発生前の期間(2006年1月1日-2008年6月13日)の東北日本の定常地殻変動の推定を行う。日座標時系列に対し、線形トレンドと年周・半年周変動成分から構成される定常地殻変動モデルの各項の係数を最小二乗法により推定を行い、線形成分の傾きから、各観測点の変位速度を算出する。得られた変位速度の空間分布によると、東北日本は、プレート間固着の影響が支配的で、東西方向の短縮および前弧域での沈降が顕著であることが分かった。これは2004年以前のデータセットを用いた先行研究と矛盾しない。また、水平ひずみ速度場は、ひずみ集中帯周辺で顕著な東西短縮を示すことが再確認できた。2008年岩手・宮城内陸地震の震源域周辺では、南北伸張が周辺地域よりもやや大きい。2004年以前までに得られている観測結果と大きな差異は無い。また、震源域の東側では、奥羽脊梁山脈から石巻湾方面に伸びるひずみ集中域も検出されている。本研究からは地震発生前の有意な異常変動は見られなかった。

第4章では、2008年岩手・宮城内陸地震後(2008年6月14日-2010年8月31日)の余効変動シグナルの抽出を行った。これは、観測値から第3章で推定した定常地殻変動成分を差し引くことによって得られる。その結果、本震後800日までの期間に、震源域を中心として顕著な余効変動が検出された。水平成分では太平洋側から日本海側に至る広い範囲で10 mm以上の変位が、上下成分では震源域近傍で顕著な沈降が見られた。この傾向は、震源域の極近傍を除いて、粘弾性緩和モデルから計算される地表変位場のパターンと類似しており、この長期・広域の余効変動の主要な原因としては、粘弾性緩和が支配的であると判断される。

第5章では、得られた余効変動場を説明するための粘弾性構造パラメータの推定を行う。上部地殻に対

応する弾性層と下部地殻以深の Maxwell 粘弾性層で構成される球殻成層地球モデルを仮定し、二つの観測期間（本震後 60-547 日間、および 60-800 日間）について、弾性層の厚さ H および粘弾性層の粘性係数 η の最適値を reduced chi-square (χ^2) が最小となるようにグリッドサーチ法により探索する。震源域近傍では粘弾性緩和以外の要因による余効変動シグナルが含まれる可能性も考えられたため、推定に使用する観測点を震央距離に応じて選択し、粘弾性緩和のみで観測値が説明可能な範囲について調べた。

本震後 60-547 日間の余効変動場から得られたパラメーターを 1σ の信頼限界で表すと、 H が 16-23 km、 η が $2.6-3.3 \times 10^{18}$ Pa \cdot s、同様に、60-800 日間の余効変動場からは、 H が 16-24 km、 η が $2.7-4.0 \times 10^{18}$ Pa \cdot s の範囲内であることがわかった。また、両期間ともに、使用した観測点の震央距離の範囲を 35-100 km としたときに χ^2 が最小となる。その時のパラメーターを 1σ の信頼区間で記すと、60-547 日間で、 $H = 19.5-25.5$ km、 $\eta = 2.4-3.4 \times 10^{18}$ Pa \cdot s、60-800 日間で、 $H = 17.0-23.5$ km、 $\eta = 3.1-4.8 \times 10^{18}$ Pa \cdot s となった。最適パラメーターによる時系列の計算値は、震央距離が 30 km 以上の観測点において、観測値と良く一致している。

第 6 章では本研究で得られた結果に基づいて、粘弾性構造の時間変化、推定された粘弾性構造パラメーターの妥当性、粘弾性緩和モデルのみでは説明し切れない残差の要因、の 3 点について議論と考察を行った。一つ目については、観測期間が長いほど、 H は小さく、 η は大きくなる傾向が見られた。粘性係数の時間変化や、余震の深さ分布の時間変化について議論している先行研究と比較すると、それらの時間変化の仕方は本研究でも同じ傾向を示す。本研究で仮定したモデルは線形粘弾性モデルであるが、実際の粘性層の粘性については応力依存性といった非線形の性質をもつ可能性もあり、定常状態への推移過程が時間変化として捉えられていると考えることもできる。二つ目の、推定結果の妥当性についても先行研究との比較を行った。弾性層の下端の深さは、本研究対象領域において推定されている D90（微小地震の震源の深さの累積頻度分布において全体の 90% となる深さ）やコンラッド面の深さの下端の値に概ね対応している。また、粘性係数については、1896 年陸羽地震後の余効変動を用いて推定されたものの約 1/3 となっている。粘性係数については、奥羽脊梁山脈直下に想定される局所的に低い粘性を反映していることや、定常状態に戻る前の時間変化の途中を見ていることなどの、二つの可能性が考えられるが、本研究からは、結論づけることはできない。

三つ目の粘弾性緩和モデルのみでは説明できない残差成分が残っている点については、実際の構造を単純化した成層構造モデルを採用したことによる限界や、余効すべりなどの粘弾性緩和以外の局所的余効変動が混在していることなどが考えられる。先行研究で指摘されている余効すべりを、単純な矩形断層でモデル化すると、震源域直上の観測点については、残差の約 70-80% が説明可能となり、先行研究によって推定されているすべり分布の傾向とも概ね一致する。ただし、他の余効変動要因を仮定した場合の変位の理論的時間発展と比較すると、非線形粘弾性流体の粘弾性緩和を仮定しても大きな違いがないことが分かった。

本研究の結果から、奥羽脊梁山脈ひずみ集中帯内で発生した 2008 年岩手・宮城内陸地震は、震源域近傍で局所的な余効すべりを発生させたと同時に、広範囲・長期間に及ぶ粘弾性変形を励起したと結論できる。本研究で採用した 1 次元的な粘弾性構造では全ての観測データを説明することはできなかったため、今後は、他の測地観測データも取り入れると共に、地震波低速度域や火山の存在を考慮した、水平方向にも不均質な粘弾性構造モデルに基づいた推定が重要となる。

論文審査の結果の要旨

測地観測は、地表変形を mm の精度で直接観測できることから現在の固体地球科学において不可欠なツールである。長期間にわたって観測される地殻の変形過程からは地下のレオロジー構造を推定することも可能であり、地震波トモグラフィーなどとともに地球の構造を知るための重要な情報源となる。

本研究の研究対象領域である東北日本は、太平洋プレートと北米 (オホーツク) プレートの収束による東西短縮が顕著であり、地震間の固着や地震時すべり、余効変動などひずみの蓄積・解放過程に関する多くの研究が行われている。一方、島弧に沿う奥羽脊梁山脈には、東西短縮速度が周辺よりも大きい「ひずみ集中帯」が存在する。このひずみ集中帯に沿って逆断層型の内陸活断層が発達しており、蓄積されたひずみを解放すべく、1896年陸羽地震 (M7.2) などの内陸大地震が発生している。2008年に発生した岩手・宮城内陸地震 (M_j7.2) も同様の内陸地震であった。

本研究では、2008年岩手・宮城内陸地震前後の GPS 連続観測データを詳細に解析することにより、長期的余効変動を捉えた。その時空間的変動パターンの特徴から、その原因が下部地殻以深の粘性的応答によるものであると着想し、粘弾性構造のモデル化を行った。最表層を弾性層、その下層を粘弾性層と仮定して、弾性層の厚さと粘弾性層の粘性係数を未知パラメーターとしてグリッドサーチによる推定を行ったところ、それぞれ 16 - 24 km, $2.6 - 4.0 \times 10^{18} \text{Pa}\cdot\text{s}$ の範囲内に推定された。推定された弾性層の下限の深さは、地震波トモグラフィーから推定されているコンラッド面や微小地震発生層の深さに概ね一致し、粘性係数も既往研究によって推定されている数値と調和的であった。さらに、本震発生後 1.5 年間と 2.2 年間の二つの期間に分けて同様の解析を行って、推定された粘性係数を比較したところ、後者のほうが前者よりも約40%ほど大きくなった。このことは、粘性の構成則が非線形である可能性を示唆していると考えられる。

以上のように、大園真子提出の論文は、最新の観測データに基づき東北日本弧の粘性構造について新しい重要な知見を加えるものであり、これは同人が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって大園真子提出の博士論文は、博士 (理学) の学位論文として合格と認める。