

氏名・(本籍)	うえ だ ひで き 上 田 英 樹
学位の種類	博 士(理 学)
学位記番号	理博第1936号
学位授与年月日	平成14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	東北日本弧で発生した大地震の余効的地殻変動とその発生メカニズム
論文審査委員	(主査) 教授 大竹 政和 教授 佐藤 春夫, 長谷川 昭, 藤本 博巳 教授 花輪 公雄 助教授 西村 太志

論 文 目 次

1 序論

- 1.1 余効的地殻変動に関するこれまでの研究
- 1.2 本研究の目的

2 余効変動の発生モデル

- 2.1 マスターモデル
- 2.2 余効すべりモデル
- 2.3 粘性緩和モデル
- 2.4 議論
- 2.5 まとめ

3 東北日本弧太平洋沖のプレート境界で発生した大地震の余効変動

3.1 序論

- 3.1.1 東北日本弧太平洋沖のプレート境界の地震性・非地震性すべりに関するこれまでの研究
- 3.1.2 東北日本弧太平洋沖でこれまでに報告されている余効すべりの事例

3.2 1978年宮城県沖地震

- 3.2.1 序論
- 3.2.2 潮位記録
- 3.2.3 水準測量データ
- 3.2.4 インバージョン解析
- 3.2.5 議論
- 3.2.6 結論

3.3 1968年十勝沖地震

- 3.3.1 序論
- 3.3.2 余効変動の検出

- 3.3.3 余効すべりモデル
- 3.3.4 結果
- 3.3.5 議論
- 3.3.6 結論
- 3.4 1938年福島県沖地震
 - 3.4.1 序論
 - 3.4.2 余効変動
 - 3.4.3 解析方法
 - 3.4.4 結果
 - 3.4.5 議論
 - 3.4.6 結論
- 3.5 議論
 - 3.5.1 余効すべりの発生過程
 - 3.5.2 余効すべりの時定数
- 4 日本海東縁で発生した大地震の余効変動
 - 4.1 序論
 - 4.1.1 日本海東縁とその周辺のテクトニクスに関するこれまでの研究
 - 4.2 1993年北海道南西沖地震
 - 4.2.1 序論
 - 4.2.2 北海道南西部の地殻変動
 - 4.2.3 粘性緩和モデル
 - 4.2.4 余効すべりモデル
 - 4.2.5 議論
 - 4.2.6 結論
 - 4.3 1964年新潟地震
 - 4.3.1 序論
 - 4.3.2 地震時の断層すべり
 - 4.3.3 地震後の余効変動
 - 4.3.4 議論
 - 4.3.5 結論
 - 4.4 1983年日本海中部地震
 - 4.4.1 序論
 - 4.4.2 余効変動
 - 4.4.3 粘性緩和モデル
 - 4.4.4 議論
 - 4.4.5 結論
 - 4.5 議論
 - 4.5.1 東北日本の粘弾性構造
 - 4.5.2 粘性率の水平方向の不均一
- 5 議論
 - 5.1 余効変動の発生メカニズムの太平洋側と日本海東縁での相違

5.2 他地域との比較

5.3 粘弾性構造と島弧の変形

6 結論

参考文献

表・図

論文内容要旨

東北日本弧では、太平洋沖のプレート境界、島弧の内陸部、日本海沖において多数の大地震が発生する。太平洋沖のプレート境界では、非地震性のすべりが著しいと言われており、その非地震性すべりと地震の発生には密接な関係があることが最近の研究から明らかになってきた。また、島弧の粘弾性変形も地震活動に影響を与えていると考えられる。しかし、プレート境界の摩擦特性やその分布、島弧の粘弾性構造は十分に解明されていない。

東北日本弧に発生した多くの大地震は余効的な地殻変動を伴ったことが知られている。しかし、その多くは発生メカニズムが明らかにされていない。他地域において詳しい調査が行われた余効変動の多くは、震源周辺の断層の余効すべりかあるいは下部地殻や上部マントルの粘性緩和によって説明されている。そのため、余効変動の発生メカニズムを明らかにすることによって、断層の摩擦特性や粘弾性構造に関する重要な知見を得ることができる。

本研究では、東北日本弧に発生した大地震について、地震発生後の余効的な地殻変動に関する詳細な調査を行った。対象とした地震は、太平洋プレートの沈み込みに伴う低角逆断層型の大地震3個（1978年宮城県沖地震、1968年十勝沖地震、1938年福島県沖地震）および日本海東縁に発生した大地震3個（1993年北海道南西沖地震、1964年新潟地震、1983年日本海中部地震）の合計6個である。この調査にあたっては、潮位観測、精密水準測量、GPS観測等、可能な限りの測地データを収集し、これらを総合的に解析することによって余効変動の実体を明らかにした。潮位観測データについては、観測された潮位変動の中から地殻変動を効果的に分離・検出する方法を新たに開発し、その有効性を示すことができた。また本論文では、本研究の結果とこれまでの研究を併せて、余効変動の特徴を明らかにし、地下構造や地震発生場との関連を論じた。本論文の構成と内容は以下の通りである。

第1章では、余効変動に関するこれまでの研究を総括し、ほとんど全ての観測事例が余効すべりモデルまたは粘性緩和モデルによって良好に説明できることを確認した。本研究では、これら2つを余効変動の発生メカニズムのマスターモデルとして採用して、両者の内どちらが支配的な要因であるかを各地震ごとに検討し、さらにモデルパラメタの推定を行った。余効すべりモデルについては、その発生領域とすべり量を未知として、観測データに最もよく適合するパラメタを求める。粘性緩和モデルの場合は、上から順に厚さ $H1$ の弾性体、厚さ $H2$ のMaxwellの粘弾性体（粘性率 η ）、半無限弾性体からなる3層水平構造を仮定して、これら3つのパラメタの最適値を求めることとした。

第2章では、これら2つのモデルに基づく理論的な計算を行った。その結果、地表で期待される変形は両モデルで大きく異なることが判明した。ここで明らかになった地殻変動の時空間パターンの特徴と相違によって、観測された余効変動の支配要因を的確に判別することが可能となった。

第3章では、太平洋側の3個の地震について解析を行い、いずれも顕著な余効変動を伴ったことが明らかとなった。この余効変動は、主にプレート境界での余効すべりによるもので、粘性緩和モデルでは説明できない。この余効すべりは、全て本震の震源域またはその深部延長上で発生した。その中でも宮城県沖地震の場合には、余効すべり領域が時間の経過とともに深部に向かって移動したことが確実である。

余効すべりによるモーメント解放量は、宮城県沖地震では本震の80-140%、十勝沖地震では18%と見積もられる。

さらに、これまでの研究事例と併せて検討を行った結果、この地域で発生した余効変動はいずれも余効すべりモデルで説明できること、余効すべり領域が本震の震源域から深部に向かって移動するという共通の性質を持つことが明らかになった。余効すべりは時間の経過とともに減衰し、その時定数は1日から2.5年程度の間分布している。この時定数は、余効すべり領域の深さと正の相関を示し、両者の関係は、速度・状態依存摩擦構成則を仮定した1次元ばねスライダーモデルによって説明できることが明らかになった。

第4章では、日本海側の3個の地震について解析を行い、いずれも顕著な余効変動を伴ったことが明らかとなった。この余効変動は主に最上部マンツルの粘性緩和によるもので、余効すべりモデルでは説明できない。余効変動から推定した最適粘弾性構造モデルは、北海道南西沖地震では、 $H1 = 40 \text{ km}$, $H2 = 45 \text{ km}$, $\eta = 4 \times 10^{18} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、新潟地震では、 $H1 = 95 \text{ km}$, $H2 = 70 \text{ km}$, $\eta = 4 \times 10^{17} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ となった。また、日本海中部地震の場合は、 $H1 = 50 \text{ km}$ が最適値となった。

上記の結果は、粘弾性層の上端はモホ面より有意に深く、下端はスラブの上面よりも有意に浅いことを示す。このことから、マンツルウェッジ内の粘性率は一定ではなく、その中に粘性率が特に低い領域が存在することが結論される。地震波トモグラフィーによるP波速度構造、Q構造との比較を行った結果、ここで得られた低粘性層は、地震波の低速度領域、低Q領域と重なり合う傾向にあることが明らかになった。この傾向と、地殻熱流量分布、マンツル物質の吸水・脱水反応などのこれまでの研究に基づいて、低粘性の主な要因は、周囲より高い温度、マンツルの部分熔融、水の存在である可能性が高いことを示した。

第5章では、以上の結果に基づき、太平洋側と日本海側で余効変動の発生メカニズムが大きく異なる原因について考察した。さらに、西日本、カリフォルニアなど他の地域の研究事例も含めて検討を行った。その結果、発生メカニズムの相違は東北日本弧特有の現象ではなく、より一般的に認められることが明らかとなった。余効すべりの発生は断層面の摩擦特性に支配され、また、粘性緩和は地下の低粘性領域の存在に強く依存するものと考えられる。この考察に基づいて、日本海東縁部の歪集中帯も、粘弾性構造の東西方向の非一様性によってもたらされている可能性が高いことを示唆した。

第6章では、本研究の主な結果をまとめた。本論文の主な結論は以下の通りである。

- (1) 東北日本弧で発生した大地震には、ほぼ普遍的に余効変動が伴うことが明らかになった。
- (2) その発生メカニズムは太平洋側と日本海側で大きく異なり、太平洋沖のプレート境界で発生する地震では、プレート境界での余効すべり、日本海東縁の大地震では粘性緩和が余効変動の主な原因となっていることが明らかとなった。
- (3) 太平洋側では、プレートの沈み込みに伴う海洋堆積物の引きずり込み、プレート境界地震の頻繁な繰り返しによってプレート境界の断層ガウジが発達し、安定すべりが起こりやすい条件にある。このために、大地震による応力の集中が余効すべりによって緩和されるものと推定される。
- (4) 日本海側では、断層ガウジが未発達で、余効すべりは起こりにくい。他方、直下のマンツルウェッジ内に著しい低粘性領域が存在し、そのために顕著な粘性緩和が生じるものと考えられる。
- (5) 東北日本弧に限らず、一般に、成熟したプレート境界では顕著な余効すべりが、また、地下が高温の地域では顕著な粘性緩和が発生する傾向が認められる。
- (6) 日本海東縁に沿う地殻歪の集中は、粘弾性構造の不均質によって説明することができる。

本研究は、東北日本弧の大地震に伴う余効的な地殻変動について、初めてその全体像を明らかにし、

余効変動の発生メカニズムに統一的な説明を与えた。これによって、今まで個別に研究されてきた余効すべりモデル、粘性緩和モデルの相違とその意味を鮮明に理解することが可能になった。さらに、地下の粘弾性構造が島弧の変形に大きな影響を与える可能性が示された。これらの成果は、東北日本弧の地震テクトニクス の 解明 に 新 た な 重 要 な 貢 献 を な す も の で あ る。

本研究ではまた、潮位観測データの解析方法を新たに開発し、その成果は余効変動の検出とモデル化に重要な役割を果たした。地殻変動の連続観測やGPS観測が未整備の時代にあっては、験潮観測は余効変動の時間的経過を知る唯一の情報源である。今後、この方法を用いて、東北日本弧以外の古い時代の大地震についても調査を行い、解析事例を蓄積することが必要である。

一方、本研究で用いた粘弾性構造は、単純な水平3層構造モデルにとどまり、必ずしも高い解像力をもつものではない。今後、有限要素法などを用いたより精緻な解析を進めることにより、粘弾性構造の詳細を明らかにする必要がある。このような研究を通じて、島弧のテクトニクスと地震発生場に関する理解をより深めることができると期待する。

論文審査の結果の要旨

大地震の発生に続いて、震源域付近で余効的な地殻変動が観測される場合がある。本論文は、東北日本弧に発生した大地震を対象として、この余効変動の実体と発生メカニズムの詳細を解明したものである。

対象とした地震は、太平洋プレートの沈み込みに伴って発生した1938年福島県沖地震、1968年十勝沖地震、1978年宮城県沖地震、日本海東縁に発生した1964年新潟地震、1983年日本海中部地震、1993年北海道南西沖地震の合計6地震である。これらの地震について、各種の地殻変動データを可能な限り収集し、総合的かつ詳細な解析を進めた結果、以下の結論を得た。

- (1) これら6個の大地震は、全て顕著な余効変動を伴った。既往の諸研究の結果と合わせ検討を行った結果、東北日本弧の大地震には、ほぼ普遍的に余効変動が伴うことが明らかになった。
- (2) 余効変動の発生メカニズムは東北日本弧の東側と西側で大きく異なり、太平洋プレートの沈み込みに伴う大地震ではプレート境界の余効すべりが、また、日本海東縁の大地震では地震時に発生した応力変化の粘性緩和が支配的な要因となっている。
- (3) このメカニズムの相違は、最上部マントル内の粘弾性構造の差異および断層ガウジの発達度の差異に起因する可能性が高い。

太平洋側のプレート境界地震については、余効すべりが時間の経過とともに深部に移動すること、余効すべりのモーメント解放量が本震のそれに匹敵すること（1978年宮城県沖地震では本震の80–140%）など重要な事実が明らかにされた。この成果は、プレート間すべりの時空間変化に新たな知見を加え、今後の地震発生サイクルの理論構築に大きく寄与するものである。余効変動の発生メカニズムについては、これまでに余効すべり、粘性緩和の2つのモデルが提唱されてきたが、いずれも個別の研究にとどまり、両者を包括した検討には至らなかった。本研究によって、初めて、余効変動発生メカニズムの地域的相違とその原因が解明された。

これらの研究成果は、著者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、上田英樹提出の論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。