

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	Hidayat Panuntun
論文題目	Poroelastic rebound following the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw=9.0) as deduced from geodetic data and its application to infer the Poisson's ratio (測地データにより推定された 2011 年東北地方太平洋沖地震(Mw=9.0)に伴う間隙弾性反発とそのポアッソン比の推定への応用)		
(論文内容の要旨)			
地震後に長期間にわたって余効変動と呼ばれる地殻変動が発生している。余効変動には主に、余効すべり、粘弾性緩和、間隙弾性反発 3 つのメカニズムが関与していると考えられている。余効すべりはプレート境界面で地震時にすべらなかった領域が地震による応力増加によってゆっくりとすべる現象で、地震時変動よりやや小さい変動がやや広い領域で観測され、半年～数年程度継続する。粘弾性緩和は、アセノスフェアの応力が地震によって増加するものの、アセノスフェアが流動的な性質を持つため、応力が緩和（拡散）していく現象で、地震時変動よりやや小さい変動が広い領域で観測され、数年～数十年程度継続する。間隙弾性反発は間隙流体を含む多孔質弾性体中で発生する。このような領域が地震時に圧縮されると、地震後に間隙流体が流出し、媒質が収縮する。このことに伴う地殻変動が間隙弾性反発で、地震時変動より小さい現象が狭い領域で観測され、数週間～数ヶ月程度継続する。そのため、海溝型地震の余効変動のモデリングでは無視されることがほとんどであった。本研究は、間隙弾性反発を考慮して 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震と呼ぶ）の余効変動をモデル化し、3 つのメカニズムについて評価・再評価するとともに、地下の媒質の物性定数の推定を行った。 余効変動の解析で用いたデータは、2011/3/12-2011/7/30 の 140 日間の変位時系列である。余効変動を Tobita(2016)で提案された指数関数と対数関数の和の形で表し、これに定常的にみられるトレンドと季節変動を表す線形項や周期成分を加え、それぞれの関数の係数を最小二乗法で推定し、推定された各係数をもとに 140 日間の累積変位場を求めた。 余効変動のモデリング手法は以下の通りである、(1) 余効変動のモデル計算のうち粘弾性緩和と間隙弾性反発の計算には地震時の断層すべり分布が必要である。計算の整合性を保つため、本研究では余効変動のモデリングに先立って観測点での地震時変位から地震時すべり分布を独自に推定した。(2) 余効変動の各メカニズムによる寄与の計算方法は以下の通りである。(i) 余効すべり：後述する方法で先に粘弾性緩和と間隙弾性反発の寄与を推定し、これらによって計算される観測点変位をデータから引いたものが余効すべりによる変動であるとし、インバージョンによって余効すべり分布を推定した。ii) 粘弾性緩和：成層構造を成すリソスフェアの厚さ H とアセノスフェアの粘性率 η を仮定し、Wang et al. (2006)による PSGRN を用いて粘弾性応答を計算する。(iii) 間隙弾性反発：非排水条件のポアッソン比 ν_u と排水条件のポアッソン比 ν_d の値を仮定し、弾性応答関数を用いて変位を計算する。以上(i)-(iii)より、H, η, ν_u, ν_d の 4 つのパラメータが決まれば、各メカニズムによる寄与が計算できる。(3) H, η, ν_u, ν_d の推定は 4 次元の最適化問題であるが、計算コストを下げるため、(H, η)と(ν_u, ν_d)の 2 組に分け、一方を固定して他方を推定するという 2 つの 2 次元の最適化問題とした。その結果、(ν_u, ν_d)=(0.34, 0.25), (H, η)=(40km, 3.16×10^{18}Pa)と求まり、間隙弾性反発による変位場は震源付近で最大で、水平 36cm, 上下 21cm と推定された。			

得られた結果から、間隙弾性反発を考慮すると、余効すべりが従来推定されたものより小さく求まること、アセノスフェア媒質が1つの時定数で特徴付けられる Maxwell レオロジーでデータを表現できることなどが明らかになった。特に後者に関しては、データの時間変化に合わせるために2つの時定数をもつ Burgers レオロジーが用いられることが多かったが、それを支持する実験結果が少ないことが問題視されていた。本研究の結果はそのような複雑なレオロジーを用いずにデータに適合させることができることを示したものであり、一つの大きな成果と言えるだろう。さらに本研究では地下水位の時系列を検討することで、間隙弾性反発が 140 日程度で概ね完了していることを示唆している。

(論文審査の結果の要旨)

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震と呼ぶ）においては、陸上の GNSS 連続観測網および海底地殻変動観測などにより、地震時の地殻変動だけでなく、余効変動とよばれる地震後の地殻変動も、非常に高い時空間分解能で記録されている。余効変動の発生機構に関しては、断層面の非地震性すべりである余効すべり、アセノスフェアにおける粘弾性緩和、そして、間隙弾性反発の 3 つのメカニズムが提唱されているが、これまでの研究では余効すべりや粘弾性緩和のみでモデル化されることがほとんどであった。その背景には、間隙弾性反発による地殻変動が、空間的には震源近傍に、時間的には地震後数ヶ月の短い期間に限定され、生じる変位も他のメカニズムと比較してオーダーで小さいことがある。余効変動を余効すべりと粘弾性緩和でモデル化しようとする、2 つの時定数を持つ **bi-viscous** な **Burgers** レオロジーモデルを導入しないと観測変位の時間変化をうまく説明できない。しかし、現時点では実際の地下の物質でそのような振る舞いを呈するものはほとんど知られていない。本研究が震源近傍の海底地殻変動データには間隙弾性反発による変位が有意に含まれていることを考慮し、余効すべりと粘弾性緩和に加えて間隙弾性反発を考慮した余効変動モデルを構築して、東北沖地震後 140 日間の GNSS データをモデル化し、グリッドサーチによってそれぞれの寄与を評価したことは評価に値する。

間隙弾性反発による累積変位は、非排水条件のポアッソン比 ν_u と排水条件のポアッソン比 ν_d の差から計算できるので、グリッドサーチでは、 ν_u 、 ν_d 、弾性層の厚さ H 、粘弾性層の粘性率 η をグリッドサーチの探索変数とし、 (ν_u, ν_d) 平面での探索と (H, η) 平面での探索を反復することで、残差を最小にするパラメータセットを推定した。次に推定されたパラメータを用いて余効変動における粘弾性緩和および間隙弾性反発の寄与を評価した。そして、観測累積変位の差から得られた粘弾性緩和と間隙弾性反発の寄与を引いた変位を用いて余効すべりを推定した。推定された間隙弾性反発による変位は震源近傍の海底地殻変動観測点で最大となり、水平成分と上下成分の最大値はそれぞれ **36cm**、**21cm** で、余効変動のモデル化において無視することができないことを示した点は重要である。また、間隙弾性反発を考慮すれば、**(1)** 余効すべりの推定が小さくなることに加え、**(2)** **bi-viscous** なレオロジーを導入せずに観測時系列を説明できることが示された。これらの成果は、沈み込み帯のダイナミクスを理解する上で非常に重要な成果である。以上述べたように、間隙弾性反発は東北沖地震の余効変動のモデル化においてほとんど考慮されてこなかったが、この効果を適切に考慮することで、間隙弾性反発はもちろん、粘弾性緩和や余効すべりに関する知見も得たことは、余効変動の 3 つのメカニズムの発生場や沈み込み帯のダイナミクスを解明する上で非常に重要な知見として評価できる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 31 年 1 月 15 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降