

論文の内容の要旨

地震によって地球内部に生じる粘弾性変形の球対称モデルにおける 理論計算

(Theoretical computation of internal post-seismic deformation in
a spherically symmetric, non-rotating, viscoelastic, and isotropic
(SNRVEI) earth model)

氏名 高木 悠

近年の観測技術の向上によって、巨大地震に伴う地殻変動が、震央距離数百 km から数千 km に及ぶ地点で観測されるようになった。これらの観測データは、地震によって生じる変形場に関する理論的な枠組みと共に用いることによって、地震のメカニズムや地球の内部構造を推定することができる。さらに、地震活動や火山活動に対する巨大地震の影響を評価するためには、地震に伴って地球内部に生じる応力や歪などの内部変形をモデル化することが必要不可欠である。

こうした背景から、多くの研究によって、コサイスミックな変形とポストサイスミックな変形が、ディスロケーションに伴う弾性体や粘弾性体の変形としてモデル化されてきた。Okada (1985, 1992) に代表される一様半無限媒質における理論は、こうしたモデル化の一つであり、シンプルであるがゆえに使いやすく、これまで多くの研究に用いられてきた。しかし、局所的な変形からグローバルな変形（震央距離数百 km から数千 km の変形）を議論する際には、これでは不十分であることが分ってきた。すなわち、地球の曲率やセルフコンシステントな自己重力、成層構造を取り入れた理論計算手法が必要である。

ところが、これらの影響を取り入れた、球対称モデルを用いた理論計算における先行研究には欠点がある。すなわち、いくつかの研究においては、非圧縮が仮定されていたり、重力が近似されて

いたりする。また、地球モデルが単純で、いくつかの均質な層から構成されているにすぎないという場合もある。そこで、本論文では Takeuchi & Saito (1972) や Tanaka *et al.* (2006) を発展させて、これらの欠点がない、現実的な SNRVEI (spherically symmetric, non-rotating, viscoelastic, and isotropic) モデルを用いて、地球の「内部」に生じるポストサイスミックな変形を計算する新たな方法を開発した。

この新しい方法を開発するためには、二つの数学的テクニックを発展させることが必要不可欠である。一つ目は、Okubo (1993) を基に相反定理を拡張して「内部」変形を定式化することであり、もう一つは、Tanaka *et al.* (2006) を基に数値積分を用いて逆ラプラス変換を求めることである。ラプラス空間における一次の非斉次常微分方程式を解く際、先行研究では陽に述べられていないものの、特解と斉次解を足し合わせて解を求める典型的な方法では、調和次数が大きくなるにしたがって、桁落ちによる数値不安定を避けることができない。それに対して、一つ目の相反定理を用いた定式化にしたがって方程式の解を求めると、桁落ちを生じず、数値不安定の問題を解決することができる。

また、圧縮性があったり、密度や粘性が連続的に変化したりする現実的な地球モデルを用いる際は、ラプラス空間上に集積点を生じ、極の数が無限大になってしまうため、極における留数を全て足し合わせることによって逆ラプラス変換を求める慣習的な方法は用いることができない。これに対して、二つ目の数値積分を用いる方法では、適切な積分経路を選択することによって、このようなモデルに対しても逆ラプラス変換を求めることができる。これらのテクニックを用いることで、現実的な SNRVEI モデルを用いて内部変形を計算することが可能となった。換言すれば、現実的な SNRVEI モデルと用いたコサイスミックな変形とポストサイスミックな変形の理論計算に関して最終的な解決を見たと言える。

新たに開発した方法を用いて、ポストサイスミックな内部体積歪のグリーン関数を計算したところ、点震源が弾性層内にある場合、弾性層内と粘弾性層内における体積歪の時間発展が顕著に違うことが分った。時間が経過しても弾性層の体積歪はほとんど変化しないのに対して、粘弾性層内の体積歪は大きく緩和される。この特徴は、グリーン関数を断層面上で積分して得られた 2011 年東北沖地震に伴う体積歪の時間変化にも当然見られる。

地球内部の応力や歪はごく浅部 (1km 以浅) を除けば直接的な観測手段がないため、本研究の計算結果の妥当性は間接的な方法で確認せざるを得ない。そこで、体積歪が生じると密度が変化し、結果として重力を変化させることに着目し、可観測量である地表の重力変化と内部体積歪との関係を議論する。コサイスミックな変形の場合、2011 年東北沖地震によって生じる地表の重力変化の空間パターンから、震源よりも浅い部分 (例えば深さ 10km) の内部体積歪の空間パターンをイ

メージングすることができた。それは、地表から深さ 100km までのどの深度断面をとっても体積歪の水平方向の分布パターンが似ていたことに由来する。しかしながら、ポストサイスミックな変形の場合には、地表の重力変化と内部体積歪の関係はそれほど単純ではない。地表の重力変化が明らかに正である場所であっても、その直下の浅部の体積歪が膨張であるという場合がある（膨張は密度低下により負の重力変化を引き起こす）。これは、正の重力変化がより深い粘弾性層内の圧縮を反映していることによると考えられ、本研究の計算結果でもそれが裏付けられた。

粘弾性モデルを用いることによって、地表の重力変化と内部の体積歪との関係が明らかになるだけでなく、地表で観測された 2011 年東北沖地震に伴う重力変化や変位をある程度まで再現することができる。変化の正負の符号と変化の大きさのオーダーについては、粘弾性モデルによる計算結果が、2014.5 年以後の江刺、仙台及びつくばねにおける重力変化と変位を再現することができた。さらに、粘弾性緩和の直接的証拠とされる、GPS 音響測距結合方式によって観測された、震源域の直上の海底における西向きの変位も再現できた。これらの結果は、粘弾性モデルを用いて、2014.5 年以降のポストサイスミックな変形をモデル化することが可能であることを示している。

一方で、本震直後から数年後のポストサイスミックな変形は、余効滑りが原因であると考えられているにもかかわらず、2014.5 年以前の変形は、余効滑りモデルでは部分的にしか再現できない。水平変位は良く説明できるが、重力変化と鉛直変化は特に数ヶ月から 1 年程度の短期の観測を再現できない。2 次的な影響である荷重変形の効果も考慮しても、モデル計算値と観測値との違いは解消されないため、このようなずれが生じる原因については将来的に考える必要がある。

短期の変化についての問題は残るものの、今や 2011 年東北沖地震などの巨大地震が引き起こす内部応力や歪の変化をモデル化することが可能となった。例えば ΔCFF を見積ることが、今後の展開として考えられる。試みに、2011 年東北沖地震によって引き起こされる、1923 年関東地震の震央直下の圧力変化を計算したところ、圧力変化の大きさが地震活動に影響を与えうると考えられている値である 10kbar のオーダーであることがわかった。また、数十年時間が経過すると、符号が変化することも分った。これらの結果は、 ΔCFF などの応力変化や歪変化を計算する際に、粘弾性の効果を考慮することの重要性を示している。