

平成 24 年度年次報告

課題番号：1441

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動・重力のモニタリングとモデル化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

5. 超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進

- (1) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明のための観測研究
 - イ. 超巨大地震の発生とその前後の過程の解明

(4) その他関連する建議の項目：

5. 超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進

- (1) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明のための観測研究
 - ア. 超巨大地震の発生サイクルの解明
 - ウ. 超巨大地震に誘発された内陸地震や火山活動等の解明
- (2) 超巨大地震とそれに起因する現象の予測のための観測研究
 - ア. 超巨大地震の震源域における地殻活動のモニタリング
 - イ. 超巨大地震の長期評価手法

(5) 本課題の 5か年の到達目標：

東北地方太平洋沖地震の後、大規模な余効変動が GPS により観測されている。この余効変動の発生原因としては、プレート境界面上の余効滑り、下部地殻・上部マントルの粘性応力緩和、流体の拡散など断層運動に因らない物質移動が考えられる。余効変動や余効滑りによって生じるプレート境界面や内陸における応力変化は、今後のプレート境界面上の滑りの時間変化や余震・誘発地震活動に大きな影響を与えると予想される。また、東北地方の太平洋沿岸で測地学的に観測されている地震間・地震時の沈降と地質学的に観測されている沿岸の隆起の間の矛盾が大規模な余効変動によって説明できる可能性が以前から指摘されている。さらに、これまでの余効滑りの研究から、余効滑りの時空間変化から断層の摩擦特性についての情報が得られる可能性があることが分かっており、このような情報は、超巨大地震発生サイクルの数値シミュレーションによるモデル化に有益である。従って、東北日本における超巨大地震発生サイクルを理解し、将来的にその予測シミュレーションモデルを構築するためには、余効変動と余効滑りの詳細なモニタリングを行い、その発生メカニズムを解明することが重要である。本課題では、GPS 連続観測と重力観測を実施し、得られたデータと国土地理院 GEONET の GPS データ及びひずみ計・傾斜計データ等の測地データを統合的に解析することにより、余効変動と余効滑りのモニタリングと発生メカニズムの解明を行い、余震・誘発地震活動への影響を評価する。東北日本の超巨大地震発生サイクルの包括的な理解のために、本課題では、東北地方太平洋沖地震前の地殻変動についても検討を行う。東北地方太平洋沖地震前の GPS データから、東北日本のプレート境界面における固着状況や M6-7 級地震の余効滑りの発生様式の顕著な時間変化が報告されている。

本課題では GPS データを用いて 1996 年から東北地方太平洋沖地震発生までの滑り・滑り欠損速度の時間変化を従来の研究よりも高い時間分解能で明らかにし、時間変化のメカニズムを考察する。

(6) 本課題の 5か年計画の概要 :

【平成 24 年度】

今年度までに設置した千葉県から茨城県の沿岸部及びいわき市周辺の誘発地震発生域の GPS 連続観測点における観測を継続する。得られた GPS データと GEONET の GPS データを同一の解析ソフトウェアで統合解析し、余効変動のモニタリングを行う枠組みを構築する。GPS 座標時系列から断層滑りの時空間変化を推定する時間依存インバージョン法を用いて余効滑りの時空間変化を 1 日毎に推定する。

東日本を中心とする地域の地震前後のひずみ計・傾斜計データを収集し、前記で推定された余効滑りから予測される変動と調和的であるかを検証する。

余効変動の影響は震源から水平距離 100km 以上に及ぶため、地球の曲率の影響を評価する必要がある。このため、球体地球モデルを仮定したディスロケーション理論を用いて観測データをインバージョン解析するためのコード開発に着手する。このコードによる解析結果と半無限媒質を仮定した場合の解析結果との比較を行い、曲率が滑り分布の推定に与える影響を評価する。

本震の滑り分布モデルと粘弹性・球体地球モデルを仮定したディスロケーション理論を用いて東北地方太平洋沖地震後の粘性応力緩和による地殻変動の計算を行い、GPS データと比較して下部地殻・上部マントルの粘性率構造の推定を行う。

余効変動による上下変動と地下の密度変化を検出するために、絶対・相対重力観測を東北地方及びその周辺の地域で実施する。得られたデータから流体等の物質移動の検出を試みる。

1996 年から東北地方太平洋沖地震までの GEONET の GPS データを余効変動と同一の枠組みで解析し、座標時系列を得る。得られた時系列に時間依存インバージョン法を適用し、東北地方太平洋沖地震前の M6-7 級地震の余効滑りにおける滑り速度の時間変化を 1 日毎に推定する。

【平成 25 年度】

平成 24 年度と同様の GPS 観測を継続し、得られた GPS データを平成 24 年度と同様に解析して余効変動のモニタリングを継続する。また、GPS 座標時系列の時間依存インバージョンによる余効滑りの時空間変化のモニタリングを継続する。

ひずみ計・傾斜計記録について、東北地方太平洋沖地震の余効変動と考えられる長期の安定な記録が得られている観測記録を抽出してインバージョンに組み込むことを試みる。また、余効変動では説明のできない局所的な影響が有意に大きいと考えられる観測点についてその原因を考察する。

観測された余効変動には余効滑りの影響と粘性応力緩和の影響が両方含まれると考えられるため、余効滑りをより正確に推定するためには、粘弹性地球モデルを用いて余効滑りの推定を行う必要がある。そこで、粘弹性・球体地球モデルを仮定したディスロケーション理論を用いて余効滑りの時空間変化を推定するためのインバージョン手法の開発に着手する。

平成 24 年度と同様の重力観測を継続し、流体等の物質移動の検出を試みる。

東北地方太平洋沖地震前の地殻変動については、平成 24 年度に得られた 1996 年から地震前までの GPS 座標時系列に時間依存インバージョン法を適用し、プレート境界における滑り欠損速度・滑り速度の時空間変化を従来の研究よりも高い時間分解能で推定する。

(7) 平成 24 年度成果の概要 :

(1) GPS 観測

東京大学地震研究所では、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生を受けて福島、茨城、千葉各県沖のプレート境界における余効滑りを高分解能でモニターするため、平成 23 年度の所長裁量経費により上記 3 県内の合計 20 か所において GPS 連続観測点を設置した。それら観測点の多くは小中学校や役場の屋上を借用して設置されている。使用している GPS 受信機は、Trimble 4000SSi または NetR8 である。

観測データは、プリペイド携帯電話端末を用いたシステム（出町・他, 2012）により、インターネット経由で1日1回収集している。図1に各観測点のITRF2008(IGS2008)系における座標の時系列を示す。20か所の新設観測点のうち、神栖市立柳川小学校と白子町立南白亀（なばき）小学校は耐震工事のために十分なデータが得られておらず、今回は解析対象から外してある。解析にはGIPSY-OASIS II Ver. 6.1.2の精密単独測位法（PPP）を使用し、天頂大気遅延及び遅延勾配量を同時推定した。英字のコードで示された本研究課題で設置した観測点の時系列では、稀にアウトライアーや見られるものの、数字のみのコードで示されたGEONET観測点と比べてほとんど遜色ない解析結果が得られている。図2に研究対象地域における2012年1月以降の変位速度場を示す。余効変動の影響により、北部ほど東南東向きの変位が大きくなっていることが分かる。また、GEONET観測点との間に系統的な差はないよう見える。

(2) 重力観測

絶対・相対重力観測を東北地方及び北海道で実施し、前年度の観測結果との比較から余効変動の生じている期間の重力の時間変化を検出した。この結果が、既存のディスロケーションに基づく余効変動のモデルで説明できない成分を有意に含むことを確認し、地下の物質移動の可能性を明らかにした。この変化が流体移動によって解釈が可能かどうか検討を開始した。

(3) 余効滑りとプレート境界面の摩擦特性の推定

2011年東北地方太平洋沖地震の余効滑り領域における摩擦特性を推定するため、プレート境界面上における地震後約7か月間の積算余効滑り及び滑り速度の時空間変化をGPSデータに時間依存インバージョン法を適用することによって1日毎に推定した。地震直後の余効滑り速度は最大で100m/yrを超えており、2003年十勝沖地震(Mw=8.3)や2005年Nias地震(Mw=8.7)の地震直後の最大余効滑り速度（それぞれ7m/yr, 6m/yr）より一桁以上大きい。これは東北沖地震により、余効滑り領域に極めて大きな応力変化があったことを示す。これに引き続いて、10m/yrを超える滑り速度が地震後15日間程度続いた。

これまで、余効滑りの時間変化は、速度・状態依存摩擦法則から導かれた速度強化の定常摩擦を用いてモデル化されており、このようなモデルでは、剪断応力の速度依存性を表すパラメータ $(a-b)*\sigma$ (σ は有効法線応力)は、空間的には変化するが時間的には一定であると仮定してきた。多くの余効滑りの時間変化がこのモデルで説明できることが既に明らかにされているが、東北沖地震の余効滑りの時間変化はこのモデルでは説明できないことが分かった（図3）。余効滑りが $(a-b)*\sigma$ が時間的に一定な速度強化の定常摩擦に従う場合、余効滑りによるプレート境界面上における剪断応力変化 τ を滑り速度の対数 $\ln V$ で微分した結果は $(a-b)*\sigma$ を与える。従って、 $(a-b)*\sigma$ が時間的に一定の場合、 τ と $\ln V$ は比例することになる。これまで、いくつかの地震の余効滑りに対して、 τ と $\ln V$ が線形の関係を示すことが確認してきたが、東北沖地震の余効滑りでは、これらが非線形の関係を示した（図4a）。この結果は、 $(a-b)*\sigma$ が滑り速度に依存して変化することを示す。 τ と $\ln V$ の関係から $(a-b)*\sigma$ を滑り速度の関数として推定すると、滑り速度が大きくなるにつれて $(a-b)*\sigma$ が小さくなり（図4b）、摩擦滑りの安定性が減少することが分かった。推定された滑り速度に依存する $(a-b)*\sigma$ を用いて、速度強化の定常摩擦に従う1自由度モデルを用いた余効滑りのシミュレーションを行ったところ、インバージョンで推定された余効滑りの時間変化と $\tau-\ln V$ 曲線が良く再現された（図4c-f）。

数値シミュレーションから、速度強化領域における正の $(a-b)*\sigma$ の値が小さくなるほど、動的破壊が速度弱化領域から速度強化領域に伝播しやすくなり、その結果、破壊が速度強化領域を乗り越えて別の速度弱化領域に伝播する可能性が高まることが分かっている。従って、本研究で明らかにされたような速度強化領域における $(a-b)*\sigma$ の滑り速度依存性は、地震の空間的な大きさを決める一つの要因となっている可能性がある。

(4) 粘性緩和による余効変動

GPSデータから推定された本震の滑り分布と球体地球モデルを用いて、粘性応力緩和による地殻変動を計算した。現段階ではまだ余効滑りが卓越しているため、粘性を精度よく推定することは困難だっ

たため、いくつかの粘性モデルを仮定して粘性緩和の見積もりを行った。一例として、下部地殻の粘性が 10^{19} Pa、上部マントルの粘性が 10^{21} Pa の場合の地震後の長期的な上下変動速度を図 5 に示す。

(5) 地球の曲率が滑り分布推定に与える影響の評価

コサイスミックな地殻変動及び余効滑りによる地殻変動に対する曲率の影響を評価するため、球体モデルと半無限媒質との比較を開始した。滑り分布を推定するためのインバージョン手法の開発の準備段階として、点震源の場合で両者のフォワード計算の結果を比較した。その結果、最大変位で 20% 程度の差が生じることが分かった。

(6) 東北地方の長期的な上下変動についての検討

2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震の余効変動に関する調査を行った。地震時に東北地方太平洋沿岸が沈降したことから、その回復過程に着目し、断層深部延長の余効的滑りと地殻・上部マントルの粘弾性的回復の両面から地震時の沈降及び地震発生以前の長期的な沈降を回復させるモデルについて検討した。詳細については課題 1410 「日本周辺のプレート運動の精密推定」の項を参照されたい。

(8) 平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

- Fukuda, J., Y. Aoki, T. Kato, and N. Kato, 2012, Evolution of afterslip following the 2011 Tohoku-oki earthquake, Abstract T13F-2695 presented at 2012 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 3-7 Dec.
- Johnson, K. M., J. Fukuda, and P. Segall, 2012, Challenging the rate-state asperity model: Afterslip following the 2011 M9 Tohoku-oki, Japan, earthquake, Geophys. Res. Lett., 39, L20302, doi:10.1029/2012GL052901.
- 加藤照之・福田淳一・田中愛幸・青木陽介, 2012, 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震に伴う余効的地殻上下変動, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SCG74-09.
- 纏瀬一起・横田裕輔・加藤尚之・加藤照之, 2012, 日本海溝沿いのスーパーサイクルの同定とシミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SSS39-19.
- Koketsu, K., Y. Yokota, N. Kato and T. Kato, 2012, Identification and simulation of seismic supercycles along the Japan Trench including the 2011 Tohoku earthquake, Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-9357.
- 大久保修平, 2012, ナノで見た日本列島の重力変化—東北地方太平洋沖地震の影響, 地震ジャーナル, 54, 24-25.
- 大久保修平・張新林・田中愛幸・今西祐一・植木貞人・大島弘光・前川徳光, 2012, 2011 年東北地方太平洋沖地震で生じた地上重力の余効変動, 日本国際学会第 118 回講演会要旨集, 43-44.
- 田中愛幸, 2012, 球成層粘弹性地球モデルを用いた、巨大地震による地殻変動及び重力場の時空間変動に関する理論計算手法の確立（測地学会坪井賞受賞記念講演），日本地球惑星科学連合 2012 年大会。

(9) 平成 25 年度実施計画の概要：

GPS データの取得を継続し、得られたデータは下記の研究で使用する。重力観測も継続し、観測された重力変化が流体移動によって解釈が可能かどうか検討を進める。同時に、観測された地震後の重力変化の空間パターンを明らかにするため、絶対・相対重力観測に適した観測施設を東北地方に追加できないか調査する。

粘性緩和による余効変動の球体モデルによる見積もりを継続し、さらに、蓄積された GPS データと比較することで、余効滑りと粘性緩和との分離を試みる。

滑り分布の推定に対する地球の曲率の影響を評価するために、様々な点震源を用いて、半無限媒質と球体モデルから予測される地殻変動の差を更に詳細に比較する。

東北沖地震以前に東北沖のプレート境界で発生した M7 級地震に対して、GPS データから余効滑りの時空間変化を時間依存インバージョン法により推定し、その結果から、本年度と同様の方法で余効滑り領域における $(a-b)*\sigma$ の空間分布と速度依存性を推定する。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

福田淳一, 田中愛幸, 三浦哲, 加藤照之, 加藤愛太郎, 青木陽介

他機関との共同研究の有無 : 有

GPS 大学連合参加大学

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京大学地震研究所

電話 : 03-5841-5712

e-mail : yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL :

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名 : 福田淳一

所属 : 東京大学地震研究所

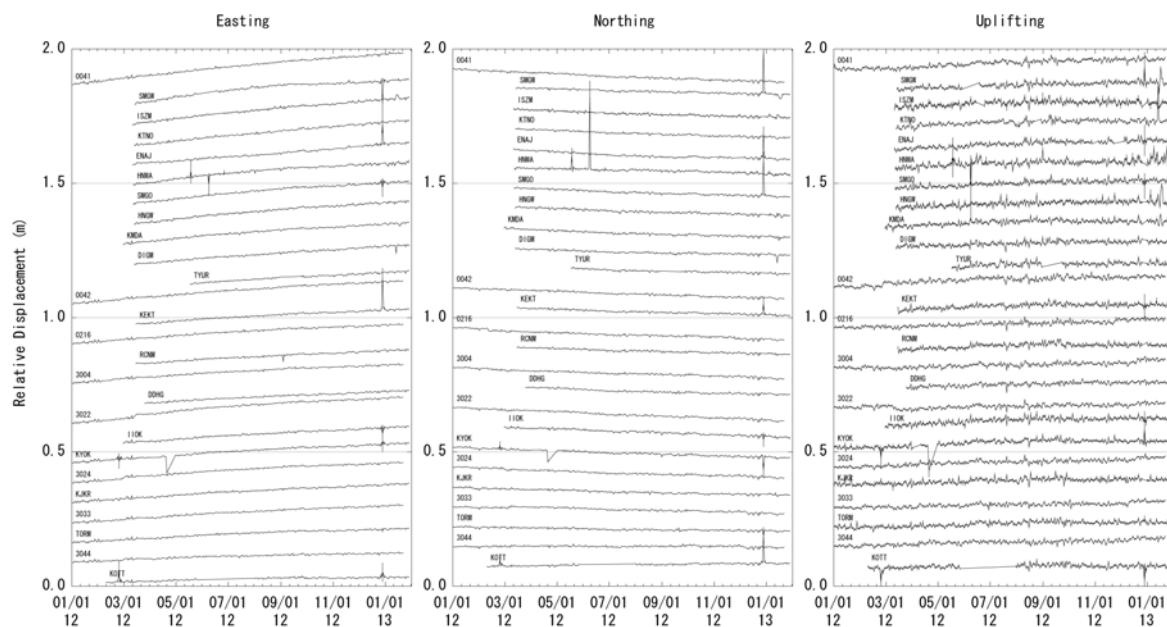


図 1: 本研究により新設された GPS 連続観測点（英字コード）の座標値時系列。数字コードは周辺の GEONET 観測点である。

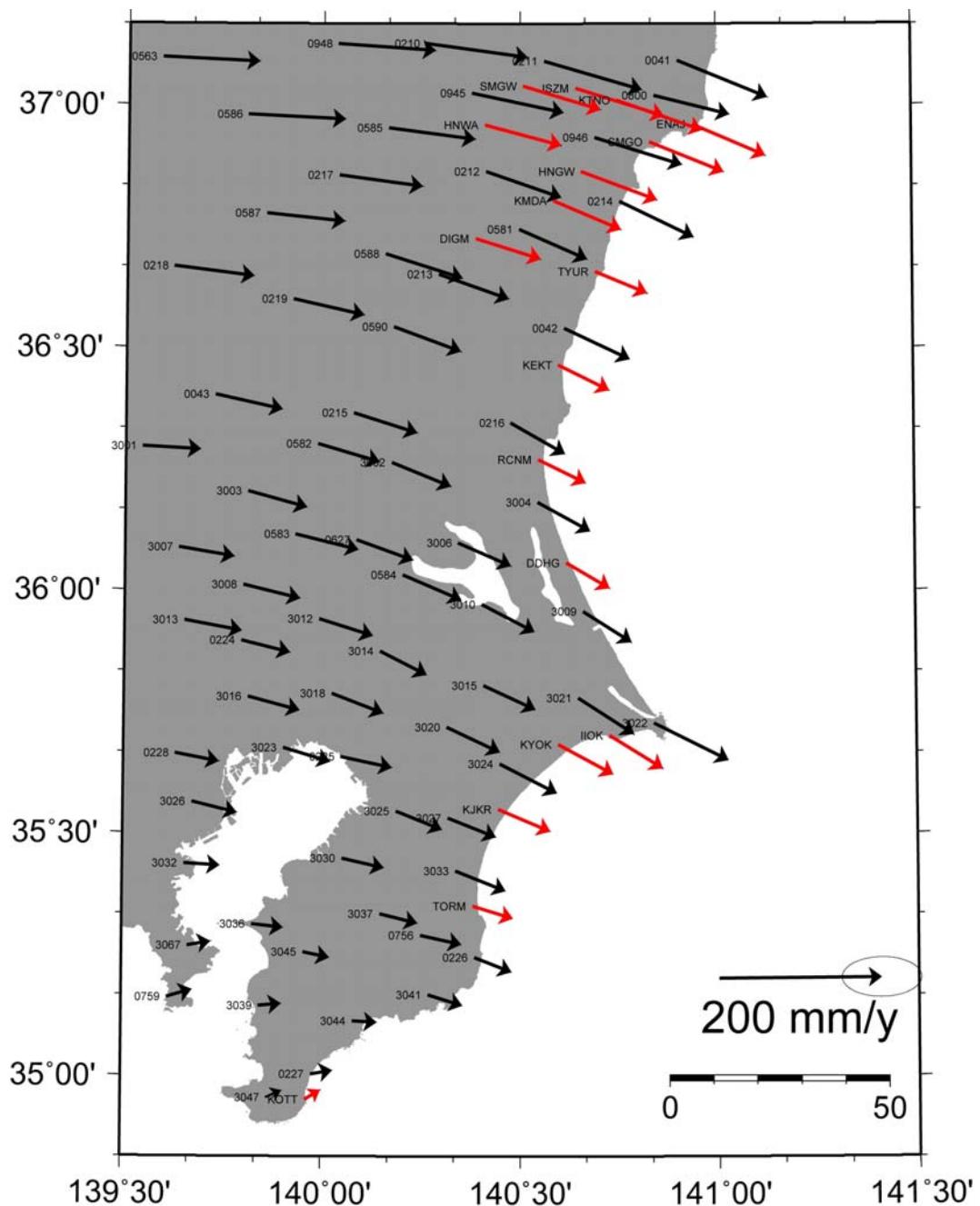


図2：研究対象領域における水平変位速度。2012年1月以降の速度場を示す。赤は新設観測点、黒はGEONET観測点を示している。

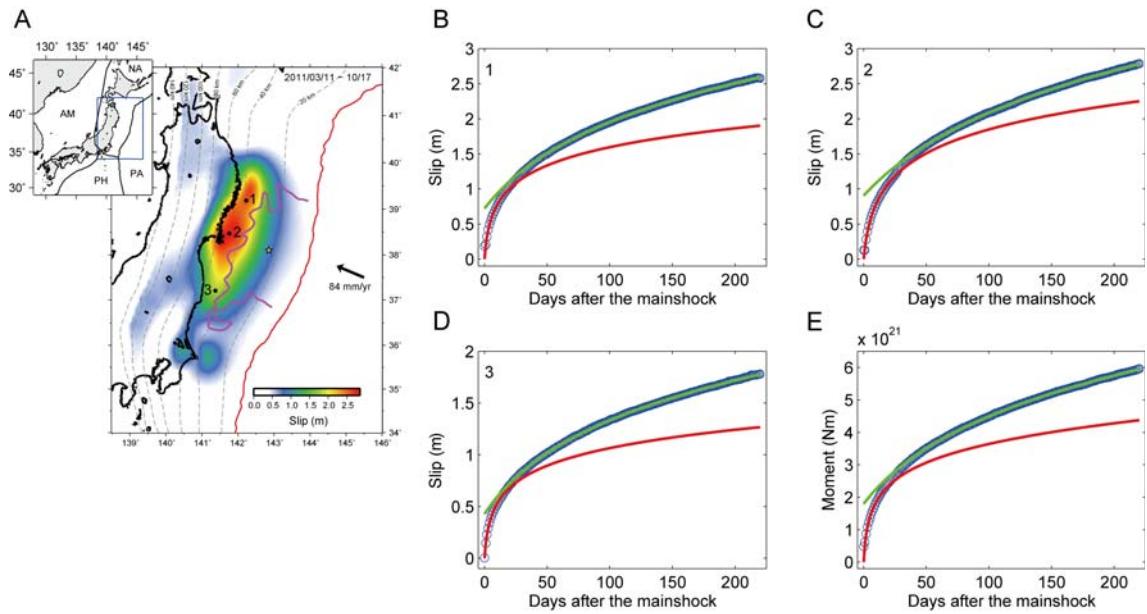


図3：(a) 2011年3月11日から10月17日までの東北地方太平洋沖地震の積算余効滑り。(b, c, d) 図(a)の点1,2,3における、インバージョンにより推定された余効滑りの時間変化（青丸）と(a-b)*sigmaが時間的に一定と仮定したモデル(Perfettini and Avouac, 2004)からの予測値の比較。赤線・緑線はそれぞれモデルを地震直後15日間及び地震後51日目以降の余効滑りに合わせた結果である。(e) インバージョンにより推定された余効滑りのモーメントの時間変化（青丸）とモデルの予測値の比較。赤線・緑線はそれぞれモデルを地震直後15日間及び地震後51日目以降のモーメントに合わせた結果である。

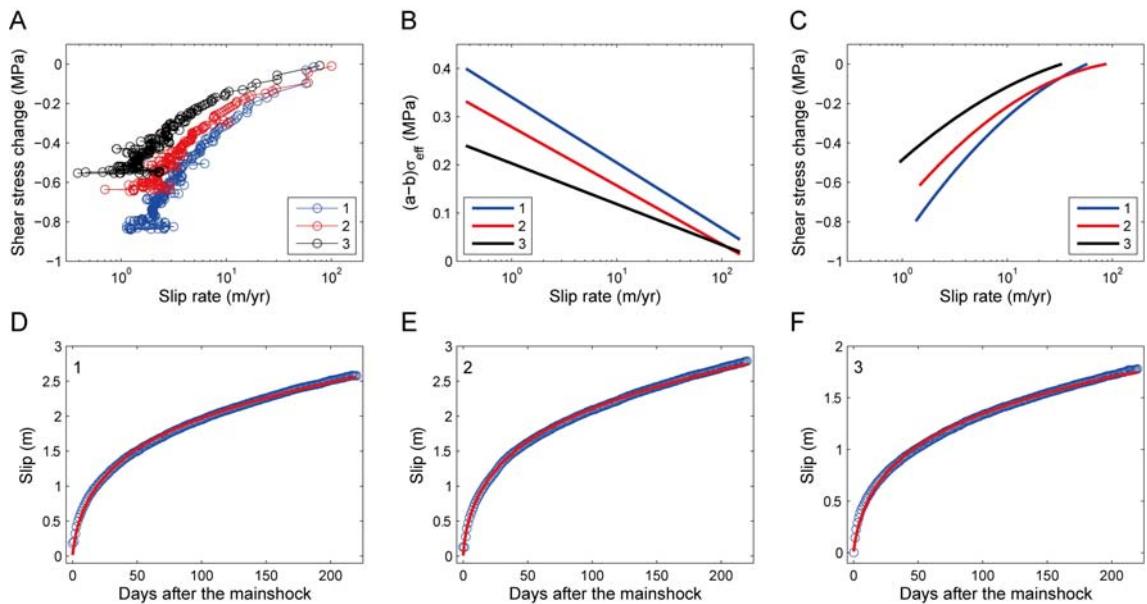


図4：(a) 図3(a)の点1,2,3における余効滑り速度と余効滑りによる剪断応力変化の関係。(b) 図(a)に示された滑り速度と剪断応力変化の関係から推定した(a-b)*sigmaの滑り速度依存性。(c) 滑り速度に依存する(a-b)*sigmaを用いた余効滑りのシミュレーションから計算された滑り速度と剪断応力変化の関係。(d, e, f) 図3(a)の点1,2,3における余効滑りの時間変化（青丸）と滑り速度に依存する(a-b)*sigmaを用いたシミュレーション（赤線）の比較。

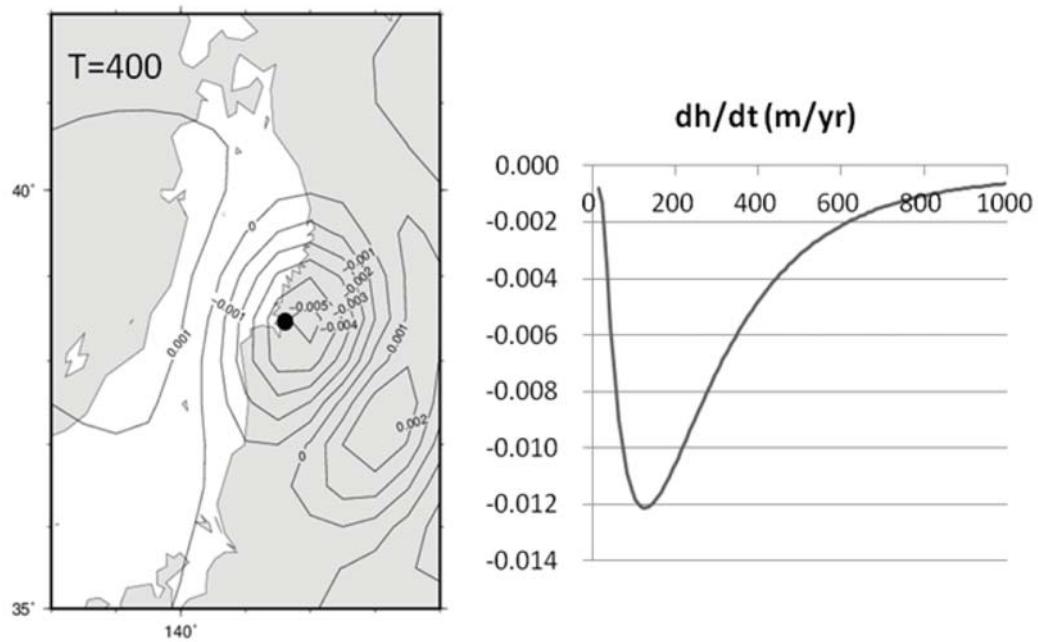


図 5：球体地球モデルによる粘性緩和の見積もり結果。左：地震後 400 年後の上下変動速度、右：牡鹿半島の地震直後から 1000 年後までの上下変動速度。