

(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弾性・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、粘弾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、粘弾性・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) 計画期間中（平成 21 年度～25 年度）の成果の概要：

(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、Trimble4000SSi または NetR8 である。

観測データは、携帯電話端末を用いたデータ伝送システム（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。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いない。

各観測点から得られる GPS 観測データの解析には、GIPSY-OASIS II ver. 6.2 の精密単独測位法（Precise Point Positioning, PPP）を用いており、毎日自動的に解析が行われている。衛星の軌道情報は ITRF2008 に準拠した IGS08 を、中性大気中の水蒸気遅延に対する補正には GMF（Boehm et al., 2006）を用いている。特に東日本では 2011 年東北地方太平洋沖地震後の顕著な余効変動が今なお継続しており（図 1）、余効滑りの時空間変動を捉えるためには、広域の余効変動成分を除去する必要がある。余効滑りや粘性緩和などを考慮した余効変動の時間発展を精確に再現する物理モデルが構築されれば、それに基づいて余効変動成分を取り除くことも可能であるが、現段階ではそれ自体が重要な研究課題であることから、本研究課題では Marone et al. (1997) を参考にして、対数関数と 1 次関数の和で定義される関数を観測データに最小二乗法によりフィットさせて除去をこころみた。図 2 にその結果を示す。2013 年末頃から特に南側の観測点でランジェントな変化が共通して観測されており、房総沖スロースリップイベントを捉えている。

(2) 重力観測とモデリング

絶対及び相対重力計を組み合わせた年 1 回の繰り返し精密重力測定を東北地方及び北海道において実施した。その結果、超巨大地震の発生後数年以内の短期的な余効変動に伴う、マイクロガルオーダーの広域的な重力変化を地上観測により世界で初めて捉えることに成功した（図 3）。現在、平成 25 年度に取得したデータの解析と、これまでに観測された重力変化を説明するためのモデリングを行っている。観測された重力変化は、地殻の上下変動や余効滑りでは説明できない成分を含んでおり、地下の物質移動が生じた可能性があることが明らかになった。なお、平成 24 年度までの重力データ及び GPS による地殻変動データを検討したところ、重力変化の原因として粘弾性緩和によると思われる長波長の変動が考えられたため、平成 25 年には震源域からの距離がなるべく遠い秋田・山形県等の日本海側にも観測網を拡大した。

モデリングの一環として、平成 24 年度の変位場に続き、応力場に対する地球の曲率の影響の研究を開始した。点震源を用いて横ずれ断層のメカニズムの場合で半無限モデルと球モデルを比較したところ、垂直応力の差が震源角距離 4 度で約 10 % に及ぶことが分かった（高木・大久保, 2013）。点震源を用いた半無限との比較はまだ継続中であり、その差を明らかにした上で、断層モデルをインヴァージョンによって求める際の曲率の影響の評価に進む予定である。

短期的な重力変化の原因を探るため、球体地球モデルにおいてバーガースレオロジーに基づく粘弾性緩和を計算する手法を開発した（田中・長谷川, 2013）。この手法は人工衛星で捉えられるような長波長の重力変化を計算することができ、GRACE データとの比較が可能である（図 4）。変位や地上観測による重力変化を計算するため、改良を進める予定である。

(3) 余効滑り

2011 年東北地方太平洋沖地震後に得られた GPS 時系列データを用いて、プレート境界面上における余効滑りと滑り速度の時空間変化を時間依存インバージョン解析により、1 日毎に推定した。余効滑りは地震時の滑り領域の西側に隣接して発生し、滑りの空間パターンは時間的にほとんど変化しなかった。推定された余効滑りの時間変化は、速度強化の定常摩擦に従うバネ・ブロックモデルを用いた余効滑りの標準的な物理モデルでは説明できないことが分かった。推定された滑り、滑り速度、及び余効滑りによるプレート境界面上での剪断応力の時間発展は、定常摩擦応力の滑り速度依存性を表すパラメータ $(a-b) \cdot \sigma$ （ σ は有効法線応力）が、高速でより不安定に近づくような滑り速度依存性を持つことを示す（Fukuda et al., 2013）。

平成 25 年度は、東北地方太平洋沖地震の余効滑りの物理モデルの構築を行った。モデルでは、半無限弾性体の内部にプレート境界面を近似する平面断層を置き、断層面上の滑り速度と応力の時間発展が速度強化の定常摩擦に従うと仮定した。地震時の滑り分布から計算された断層面上における応力変化を入力として与えてその後の余効滑りの時空間変化を計算した。なお、以下の計算では、摩擦パラ

メータ $(a-b) \cdot \sigma$ は滑り速度に依存せず一定であると仮定した。

このモデルでは、余効滑りの時空間変化は、地震時の滑り域周囲の応力集中の度合を決める震源域の端での地震時滑りの空間勾配と摩擦パラメータ $(a-b) \cdot \sigma$ に主に支配される。GPS データから推定された地震時の滑り分布をモデルの入力として用いる場合、地震時滑りの空間勾配はインバージョンにおける滑りの空間平滑化の強さに支配される。そこで、様々な強さの空間平滑化に対して地震時滑りを推定し、それらを入力として余効滑りの時空間変化を計算した。摩擦パラメータ $(a-b) \cdot \sigma$ の値は、モデル計算と GPS データから推定された余効滑りのモーメントが適合するように調整した。図 5 に平滑化が強い場合と弱い場合に対するシミュレーション結果を示す。この結果から、平滑化の強さ（地震時の応力集中の度合い）が異なっても、余効滑りの時空間変化の特徴は大きくは変化しないことが分かる。モデルと GPS データから推定された余効滑りのモーメントの時間変化の間には系統的な差異がある（図 5d, h）。これら結果は、断層モデルを用いて応力・滑り速度の空間変化を考慮した場合であっても、 $(a-b) \cdot \sigma$ が一定の速度強化の摩擦特性ではインバージョン解析から得られた余効滑りを説明できないことを示す。系統的な差異の原因として、 $(a-b) \cdot \sigma$ の滑り速度依存性の他、粘弾性緩和など余効滑り以外の応力緩和プロセスが考えられ、今後それらをモデルに取り入れる予定である。

(4) 房総スロースリップイベント

本課題の GPS 観測点で 2013 年末から 2014 年にかけて房総半島沖のスロースリップイベントに伴う地殻変動が観測された。本課題の観測点 6 点と国土地理院 GEONET の観測点 71 点における GPS 時系列データ（図 6a）を用いて、2013 年 11 月 1 日から 2014 年 2 月 1 日の期間に対して、フィリピン海プレート上面における滑り・滑り速度の時空間発展を時間依存インバージョン解析により推定した。滑りは、地震活動が起きた領域より東側で地震活動より前にゆっくりと始まり、12 月末から急激に加速して西に伝播した。加速は 1 月 3 日頃まで続きその後急激に減速した（図 6b）。速い滑りが起きた期間は、地震活動が活発化した期間にほぼ一致する。また、滑りの東から西への伝播は、震源の移動と調和的である（図 6b）。2 月 1 日までの積算モーメントは 7.87×10^{18} Nm、 M_w は 6.56 となっている。

(8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

Fukuda, J., A. Kato, N. Kato, and Y. Aoki (2013), Are the frictional properties of creeping faults persistent? Evidence from rapid afterslip following the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3613-3617, doi:10.1002/grl.50713.

Fukuda, J., K. M. Johnson, and P. Segall (2013), A mechanical model of afterslip following the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake, *American Geophysical Union 2013 Fall Meeting*, G23B-0795.

田中愛幸 (2013), 巨大地震による長期的な地殻変動及び重力場変動を球体地球モデルを用いて正確に見積もるための理論計算手法について（坪井賞受賞記念論文）, *測地学会誌*, 59, 1-10.

田中愛幸・長谷川崇 (2013), GRACE 衛星重力データから見た 2004 年スマトラ大地震の余効変動, *日本測地学会予稿集*.

高木悠, 大久保修平 (2013), 点震源によって生じる地球の内部変形 (I): 一様球の場合, *日本測地学会予稿集*.

大久保修平, 高木悠 (2013), 点震源によって生じる地球の内部変形 (II): 相反定理を用いた球対称場の計算, *日本測地学会予稿集*.

(9) 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, 加藤照之, 加藤愛太郎, 青木陽介, 大久保修平, 今西祐一

他機関との共同研究の有無：有

三浦 哲・太田雄作（東北大学）, GPS 大学連合参加大学

(10) 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：

(11) 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

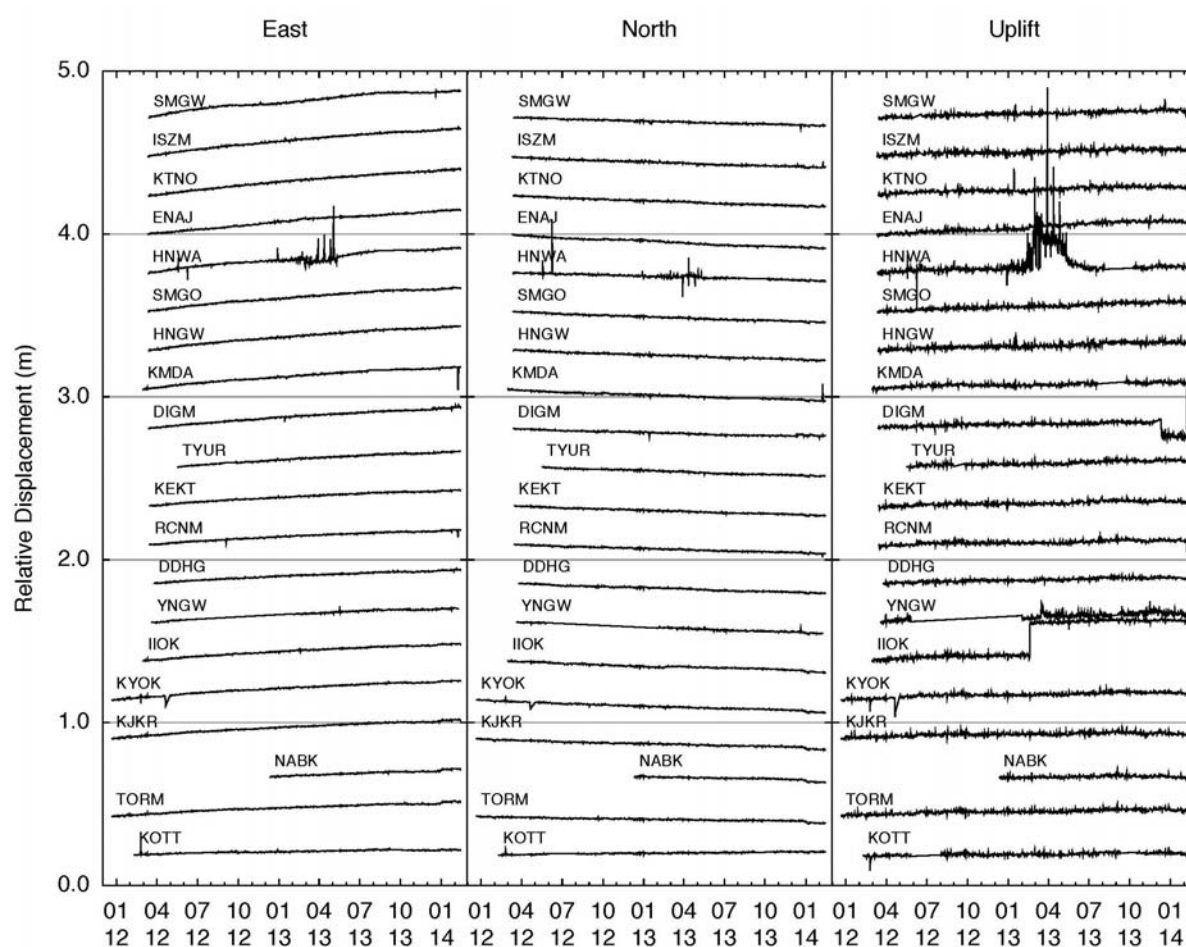


図 1. 福島，茨城，千葉各県の GPS 連続観測点における相対変位の時系列. 左から東方向，北方向，上方向の変位成分を示す. 期間は 2014 年 1 月 31 日まで.

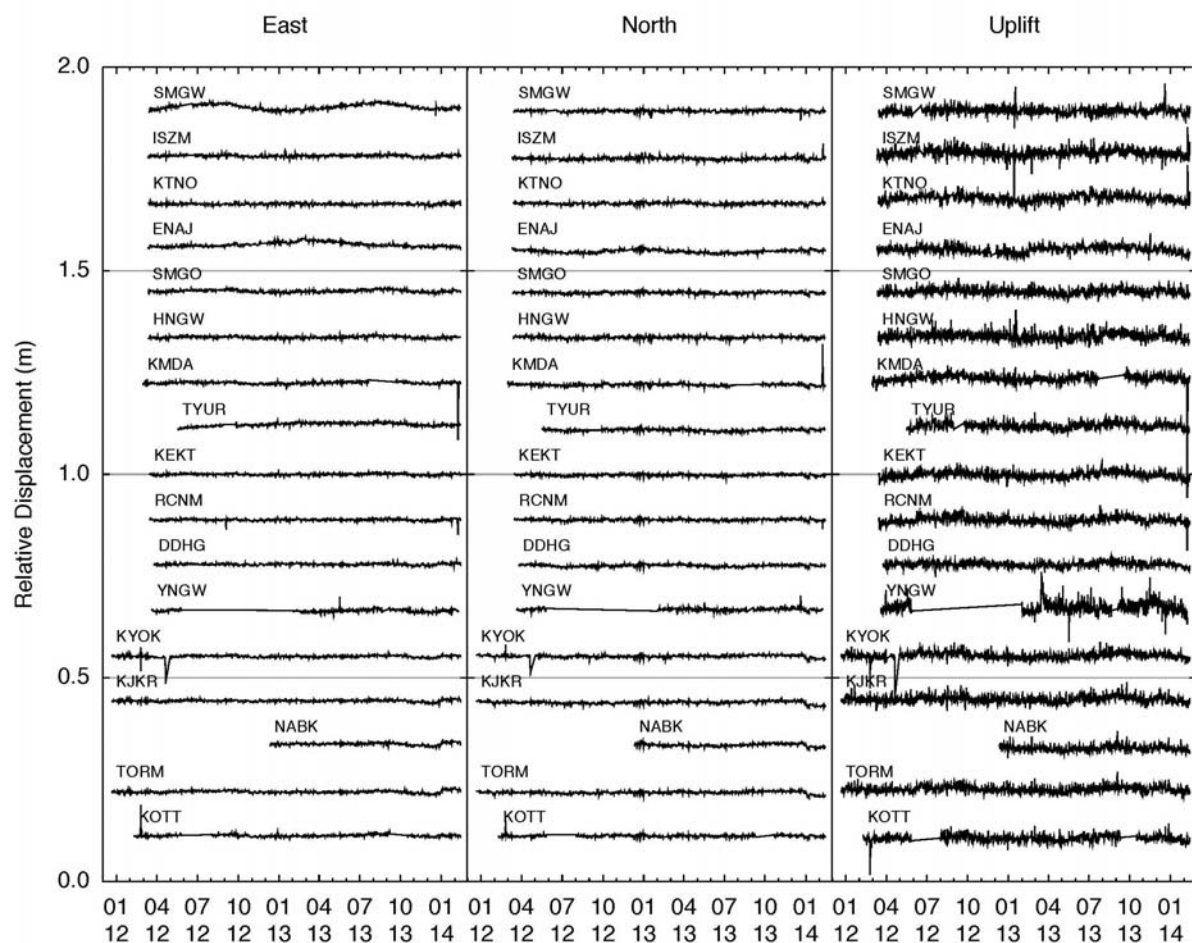


図2. 福島，茨城，千葉各県のGPS連続観測点における相対変位の時系列. 左から東方向，北方向，上方向の変位成分を示す. 期間は2014年1月31日まで. 対数関数と1次関数の和で定義される関数を観測データに最小二乗法によりフィットさせて長期間の余効変動を除去した結果を示す.

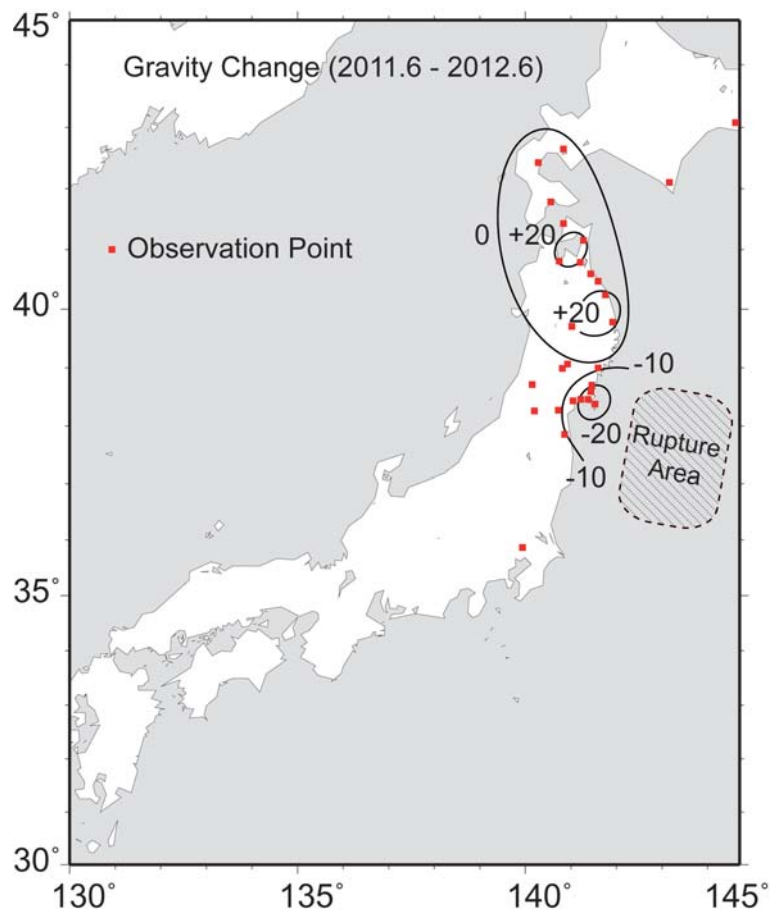


図 3. 絶対・相対測定により観測された重力変化（2011.5～6 月から 2012 年 6～7 月）. 単位は microGal. 絶対重力点 7 点, 相対重力点 27 点.

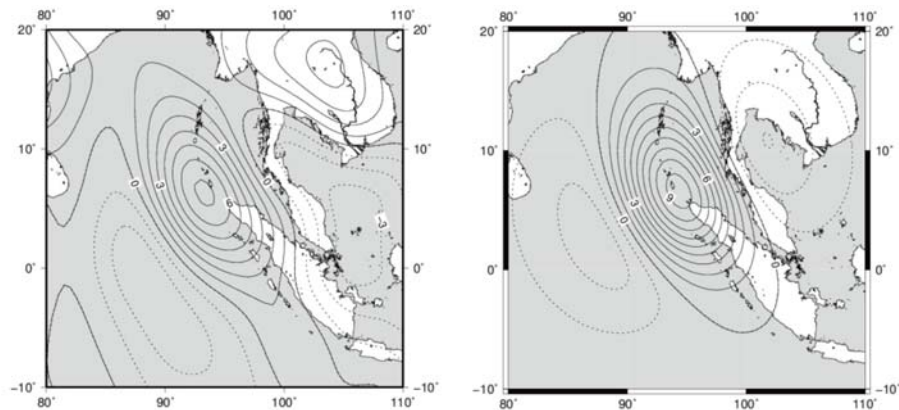


図 4. 左：GRACE 衛星重力ミッションによる観測値（2004 年スマトラ地震を例として）. 2004 年と 2011 年の平均値の差. 単位は microGal. 右：開発された球体モデルを用いて計算した粘弾性緩和.

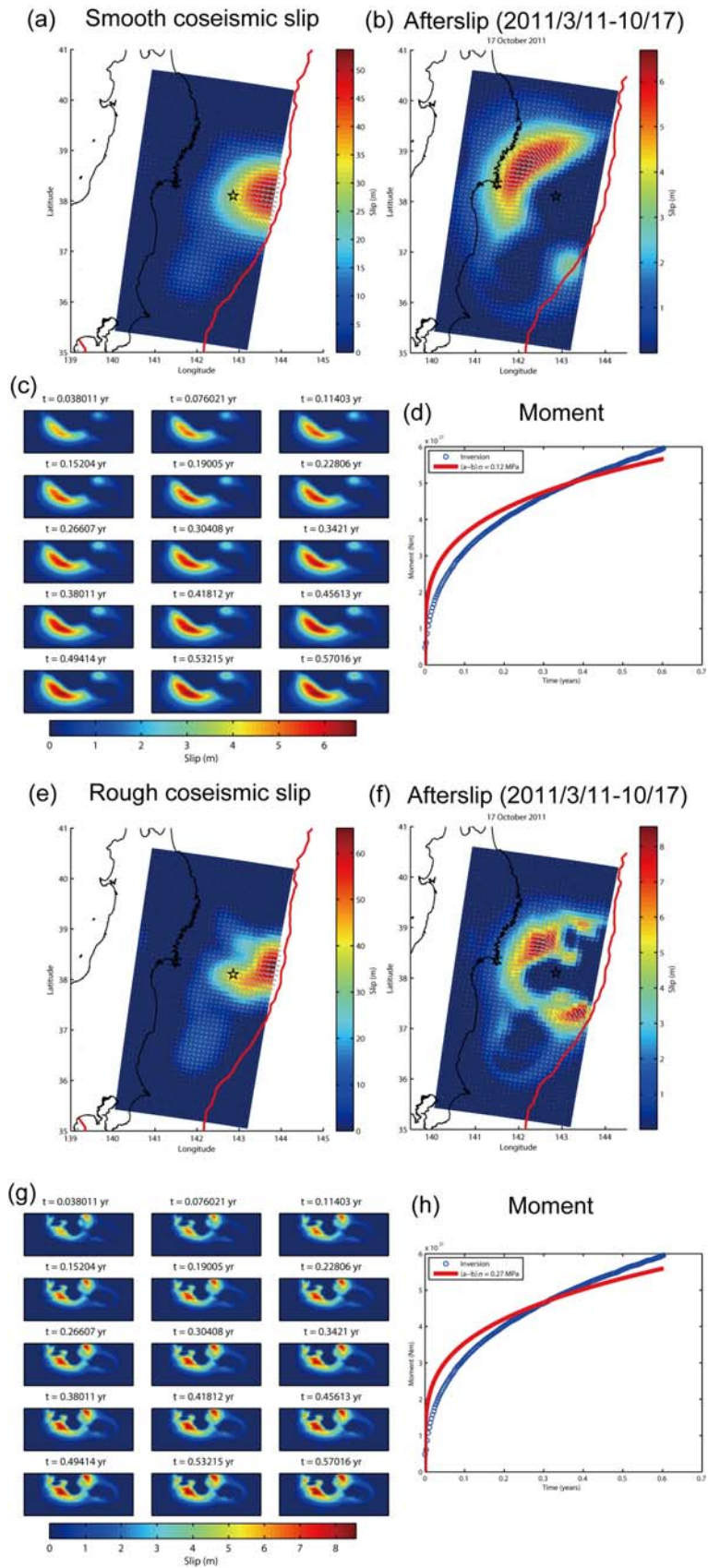


図 5. (a-d) 空間平滑化が強い地震時の滑り分布を入力とした場合の余効滑りのシミュレーション結果. (a) 地震時の滑り分布. (b) 2011/3/11-10/17 の積算余効滑り分布. (c) 積算余効滑りの時間変化. (d) モデルから計算されたモーメントの時間変化 (赤線) と GPS データから推定されたモーメントの時間変化 (青丸) の比較. (e-h) 空間平滑化が弱い地震時の滑り分布を入力とした場合の余効滑りのシミュレーション結果.

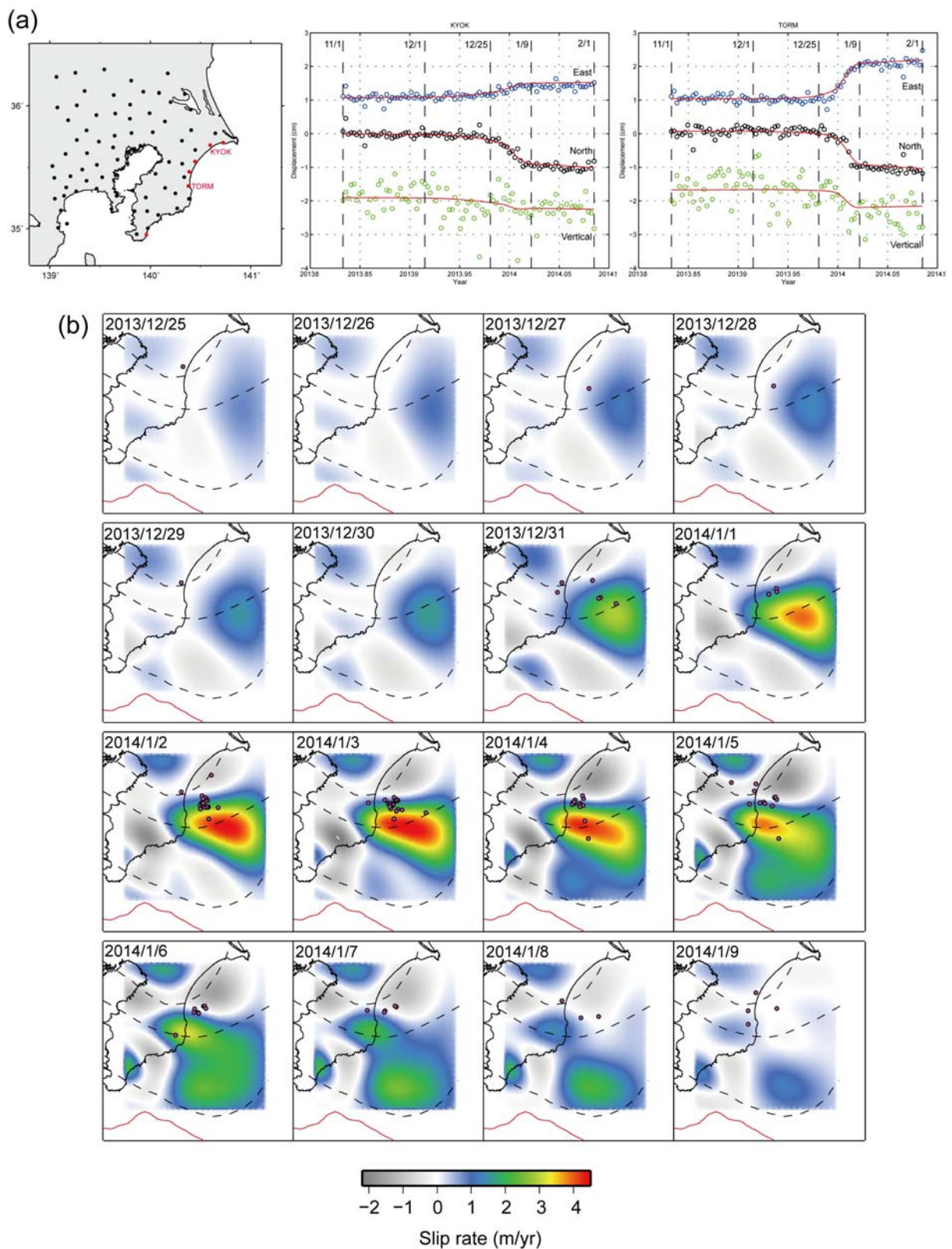


図 6. (a) 本課題の観測点 KYOK, TORM (左図) における GPS 時系列 (2013 年 11 月 1 日~2014 年 2 月 1 日). 青, 黒, 緑丸はそれぞれ, 東西, 南北, 上下成分を示す. 赤線は推定された滑りからの計算値を示す. 時系列に含まれる共通誤差は除去されている. (b) 2013 年 12 月 25 日から 2014 年 1 月 9 日までの 1 日毎の滑り速度の時空間発展. 紫色の丸は当該の日に発生した地震の震央を示す.