

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

プレート境界面上の滑りと固着の時空間変化の把握

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

イ．非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(1) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化

ア．日本列島域

イ．地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

ウ．東海・東南海・南海地域

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

ア．列島及び周辺域のプレート運動，広域応力場

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

ア．アスペリティの実体

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

測地学的手法を用いて、プレート境界面上の滑り分布の推定精度及び分解能の向上を図り、プレート境界面における固着及びゆっくり滑りの時空間的推移を解明する。また、日本列島全域の地殻活動をより高度に理解することで、中長期的な地震発生予測の精度向上を目指す。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

GPS 連続観測データを用いて、日本列島周辺のプレート境界の滑り欠損分布を推定し、地域ごとの地殻変動及び滑り欠損の特徴を明らかにした上で、その空間分布および時間変化を詳細に把握する。

また、GPS 連続観測データ及び過去の測地観測データを用いて、房総半島沖、豊後水道、東海地方等、繰り返し発生するゆっくり滑りや大地震発生後に引き続いて発生する余効すべり等の解析を行い、プレート境界面上で発生する様々な滑り現象に伴う地殻変動の特徴やその履歴を明らかにする。そして、これらの現象が、プレート境界大地震の発生サイクルに与える影響を定量的に明らかにする。

(7) 平成 23 年度成果の概要：

(1) スロースリップの時空間変化の把握

2009 年秋頃から発生していた豊後水道スロースリップは、2010 年末頃に終息し、過去 2 回（1997 年頃と 2003 年頃）と継続時間、大きさともほぼ同程度であったことが分かった（図 1）。また、非正常地殻変動が明瞭な時期には、四国西部南東側で深部低周波微動の活発化が見られることが分かった。

GPS 連続観測によって捉えられた中長期的なスロースリップは、房総半島南東沖、東海地方、豊後水道の 3 領域に限られていた。新たに日向灘においてもスロースリップが繰り返し発生していることが明らかとなった。2005 年以降、半年から 1 年程度継続し、約 2 年の周期で繰り返していることが分かった（図 2）。スロースリップの滑り領域は、1996 年 12 月の日向灘の地震の余効滑り領域の深部側とほぼ重なり、余効滑り域でスロースリップが発生し得ることが分かった。

房総半島南東沖において、2011 年 10 月末頃にスロースリップの発生を確認した。GPS 連続観測によって検知された過去 3 回（1996 年 5 月、2002 年 10 月、2007 年 8 月）と継続時間、大きさともほぼ同程度であったことが分かった（図 3）。

西南日本のフィリピン海プレート上では、短期的スロースリップが繰り返し発生していることが、傾斜計もしくはひずみ計の記録の解析から報告されていた。今回新たに GPS 連続観測を用いて短期的スロースリップを検出する手法を考案し、短期的スロースリップの発生を示唆する地殻変動を検出することに成功した。過去 15 年間のデータから 88 個の断層モデルの推定を行うことができた（図 4）。

(2) 東北地方太平洋沖地震に関する研究

日本海溝沿いのプレート境界で発生した 2005 年宮城県沖の地震、2008 年茨城県沖の地震、2008 年福島県沖の地震、2010 年福島県沖の地震、それぞれの地震の地震時及び地震後の地殻変動、推定されたモーメントの大きさを比べると、2005 年宮城県沖の地震に関しては、地震時と地震後ではほぼ同程度であるのに対して、2008 年及び 2010 年の地震では、地震後の変動およびモーメントが地震時に比べてはるかに大きいことが分かった（図 5）。これらの地震の地震時及び地震後の滑り領域は東北地方太平洋沖地震の震源域を取り囲む場所で発生していたことが分かった（図 6）。

東北地方太平洋岸の GPS 連続観測点における長期の時系列から、2000 年前後から福島県・茨城県の観測点において東向きの変位成分の増加が見られ、2003 年頃からは宮城県の観測点においても東向きの変位成分の増加が見られていたことが分かった。一方、岩手県の観測点では、1994 年三陸はるか沖地震の余効変動が小さくなったことにより、西向きの変位成分の増加が見られる（図 7）。

東北地方太平洋沖地震発生前の時系列データには、3 月 9 日の地震時の変動及びその余効変動を除いてノイズレベルを超える特筆すべき変動は見られなかった（図 8）。また、東北地方太平洋沖地震の震源域周辺での GEONET による断層滑りの検知能力は、 $M_w6.7 \sim 7.1$ 程度である（図 8）。

東北地方太平洋沖地震の発生に伴い、GEONET データによって東北地方太平洋側では東向きに 2~5m、日本海側でも 1m 前後の水平変位を観測し、牡鹿半島の先端部で最大 5.4m の水平変位を観測した（図 9a）。上下変動は岩手県から千葉県に至る太平洋側で 10cm 以上の沈降、日本海側では数 cm の隆起を観測し、牡鹿半島先端部で最大 1.1m の沈降を観測した（図 9a）。図 9(a) に示した地震時の地殻変動は、GEONET の定常解の最終解（F3 解）に基づき 3 月 10 日と 3 月 12 日の座標値解の差から算出したものであり、余震や地震直後の余効変動を含んでいることに注意が必要である。陸域の GPS 連続観測のデータから推定した地震時の滑り分布では、宮城県沖の深さ 20~30km の領域で最大 30m 弱の滑りが推定された（図 9b）。それに対して、震央付近の海域に設置された海上保安庁による海底地殻変動観測点 5 点のデータを加えて推定した結果では、海溝寄りの深さ 10~20km の領域で最大 60m 弱の滑りが推定された（図 9c）。陸域の観測データのみから推定した滑り分布に比べると、滑りの中心がより海溝側に推定された。これらの結果は、海溝軸付近でも歪みエネルギーが蓄積されていたことを示唆しているとともに、常時海域での観測がより稠密に実施されることにより、陸域の観測だけでは見えなかった海溝軸付近の歪みの蓄積・解放の分解能の向上が期待されることを示すものである。陸域及び海域の地殻変動データから、地震を引き起こした断層滑り域は、岩手県沖から茨城県沖までの南北に長さ 400km 以上、幅およそ 150km におよぶ長大なものであり、宮城県沖の海溝軸付近の領域

では最大 60m に達する滑りが推定された。相対的に宮城県沖の沿岸寄りの滑りは小さいが、その滑り量は少なくとも 5m 以上推定されており、沿岸寄りの領域で発生すると想定されている宮城県沖地震等が M7.5 程度だと考えると、今回の地震により数回分の歪みエネルギーが解放されたと考えられる。

東北地方太平洋沖地震の余効変動は、地震時の変動と同じ東向きの変動が卓越しており、地震発生後 10 カ月間で岩手県中部沿岸を中心に最大 90cm 弱の水平変動が観測されている（図 10a）。上下変動は青森県及び宮城県以南の太平洋側では隆起が観測されている。一方、岩手県の太平洋側と秋田県、山形県の内陸部では沈降が観測されている（図 10a）。上下変動に関しては、地震時の変動と全く異なる分布を示している。余効変動は、余効滑り、粘弾性緩和、間隙弾性緩和等のメカニズムが複合して生じると考えられているが、変動の時定数、東向きの水平変動や短波長の隆起、沈降等の特徴から、主原因は余効滑りであると考えられる。GEONET データに基づいて推定された余効滑りは、岩手県沿岸部に滑りのピークが位置しており、地震時の大きな滑り領域よりも深部で発生している（図 10b）。最大滑り量は 2.9m に達し、モーメントマグニチュードは Mw8.57 に達していることが分かった。

- (8) 平成 23 年度の成果に関連の深いもので、平成 23 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
Ozawa, S., T. Nishimura, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire, 2011, Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, *Nature*, **475**, 373-376, doi:10.1038/nature10227.
Suito, H., T. Nishimura, M. Tobita, T. Imakiire, and S. Ozawa, 2011, Interplate fault slip along the Japan Trench before the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake as inferred from GPS data, *Earth Planets Space*, **63**, 615-619, doi:10.5047/eps.2011.06.053.
Nishimura, T., H. Munekane, and H. Yurai, 2011, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its aftershocks observed by GEONET, *Earth Planets Space*, **63**, 631-636, doi:10.5047/eps.2011.06.025.
水藤尚, 西村卓也, 小沢慎三郎, 小林知勝, 飛田幹男, 今給黎哲郎, 原慎一郎, 矢来博司, 矢萩智裕, 木村久夫, 川元智司, 2011, GEONET による平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地震時の地殻変動と震源断層モデル, *国土地理院時報*, **122**, 29 - 37 .
水藤尚, 西村卓也, 小沢慎三郎, 飛田幹男, 原慎一郎, 矢来博司, 矢萩智裕, 木村久夫, 川元智司, 2011, GEONET による平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に引き続いて発生している余効変動と余効すべりモデル, *国土地理院時報*, **122**, 39 - 46 .
国土地理院, 2011, 東北地方の地殻変動, *地震予知連絡会会報*, **86**, 184 - 272 .
国土地理院, 2011, 中国・四国地方の地殻変動, *地震予知連絡会会報*, **86**, 542 - 558 .
国土地理院, 2011, 九州・沖縄地方の地殻変動, *地震予知連絡会会報*, **86**, 570 - 576 .
国土地理院, 2011, GPS による短期的スロースリップイベント (SSE) 検出の可能性, **85**, 510 - 516 .

- (9) 平成 24 年度実施計画の概要：

2011 年 (平成 23 年) 東北地方太平洋沖地震の余効変動及び余効滑りのモニタリングを引き続き実施するとともに、間隙弾性緩和や粘弾性緩和等の余効滑り以外の余効変動の発生メカニズムについても検討を行う。また、GEONET データに基づいた短期的スロースリップの検出方法を確立し、西南日本以外の領域についても短期的スロースリップが発生していないかについての検討を行う。

- (10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室
他機関との共同研究の有無：無

- (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：地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話：029-864-5954
e-mail：eiss@gsi.go.jp

(12) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 飛田幹男

所属 : 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

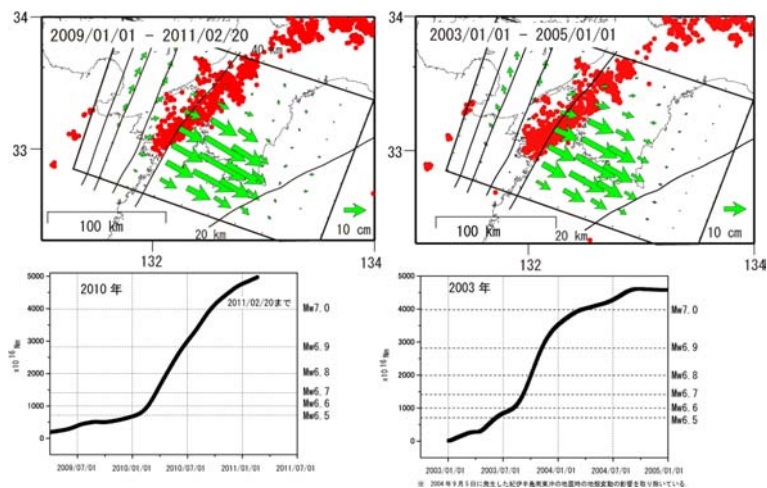


図 1 . 豊後水道で発生した 2010 年 (左側) と 2003 年 (右側) のスロースリップの比較。

上段の図は推定されたプレート境界面上の滑り分布。下段の図は推定されたモーメントの時間変化。赤丸は低周波地震 (気象庁一元化震源より)

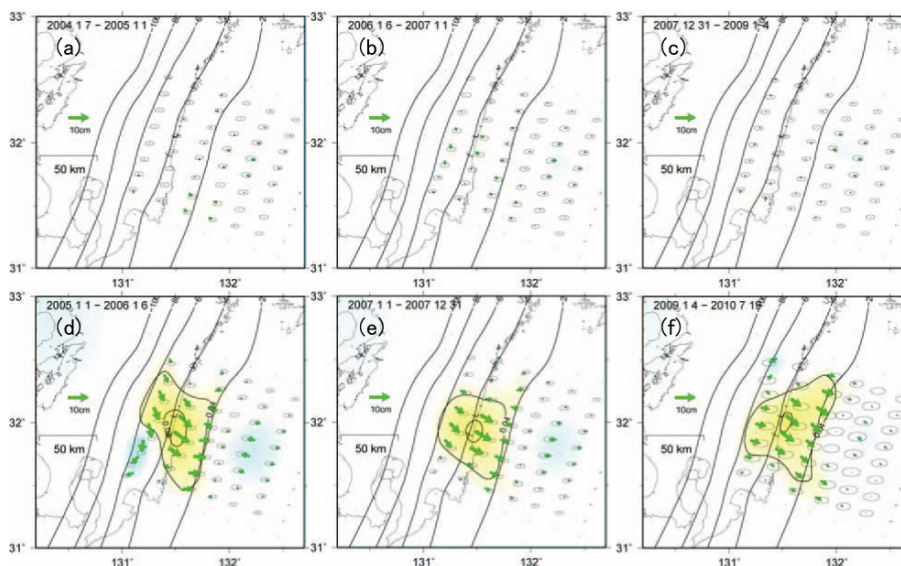


図 2 . 日向灘で発生したスロースリップの滑り分布。

2005 年以降 (d) ~ (f) の期間で繰り返し発生。(a) ~ (c) は発生していない期間。

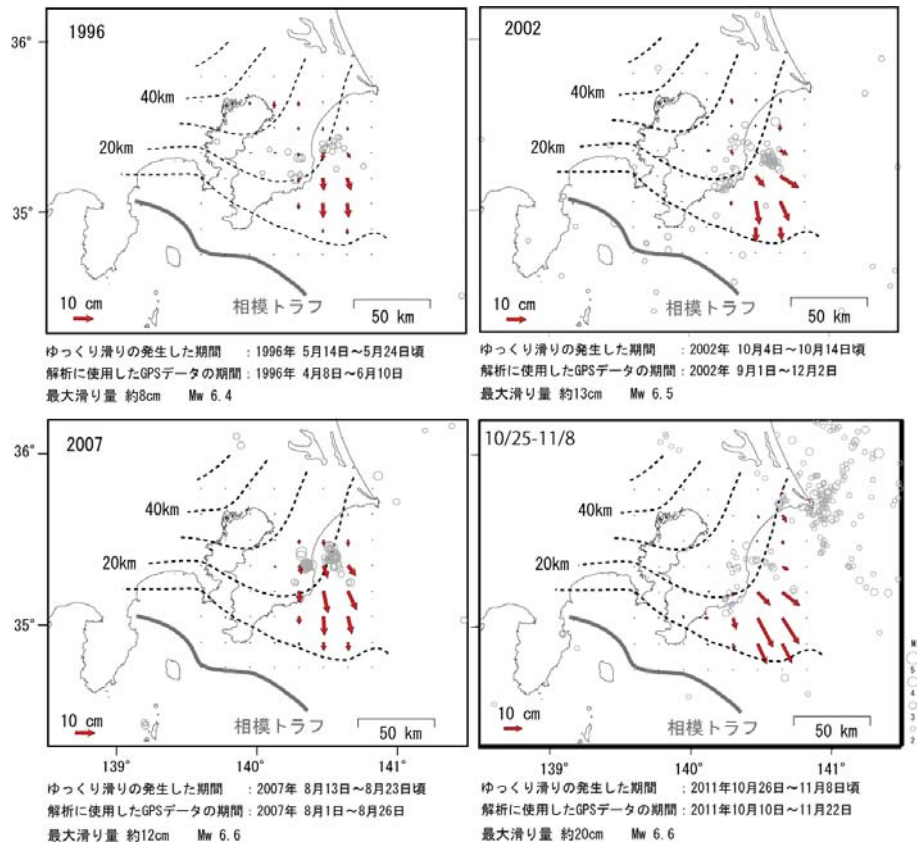


図3．房総半島南東沖で発生した1996年、2002年、2007年、2011年のスロースリップの滑り分布。丸は50km以浅かつM2以上の震央分布(気象庁一元化震源より)で、スロースリップの発生した期間のものを表示している。

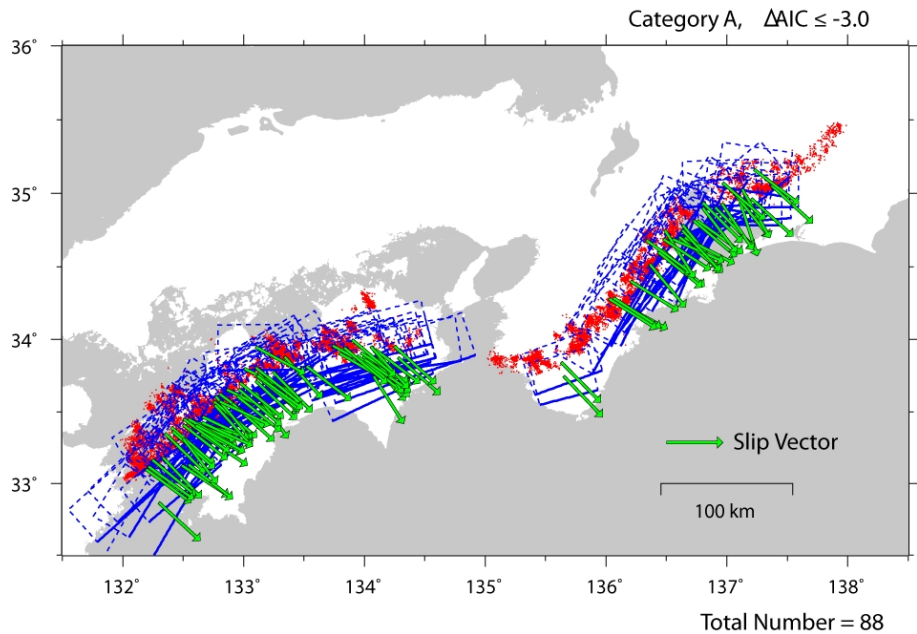


図4．GPSデータから推定した短期的スロースリップの断層面とそのスリップベクトル。

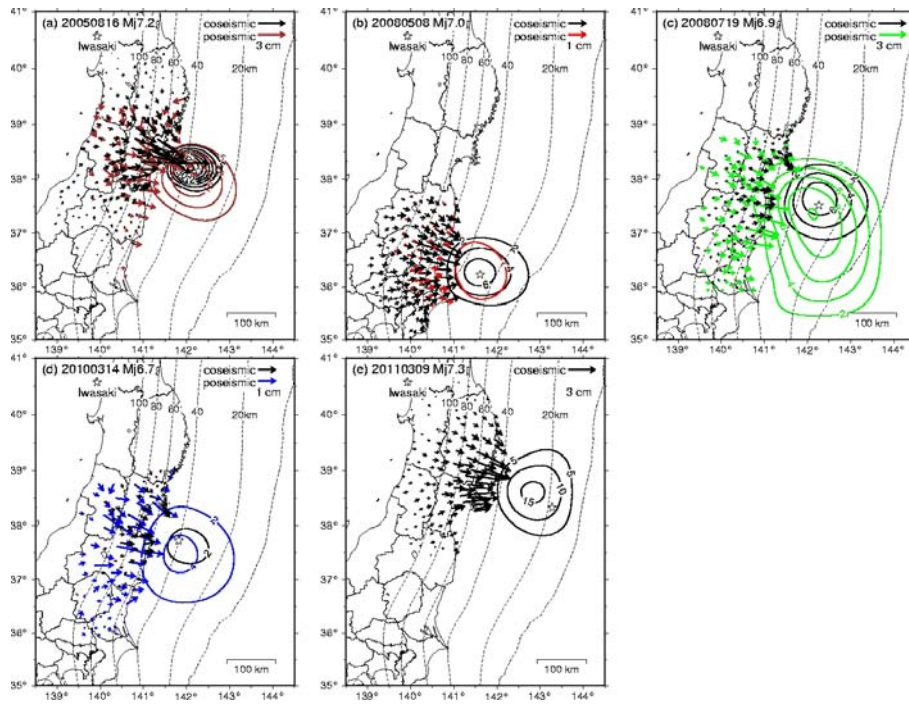


図5．日本海溝沿いで発生した地震の地震時および地震後の地殻変動と滑り分布の比較。
 (a)2005年宮城県沖の地震、(b)2008年茨城県沖の地震、(c)2008年福島県沖の地震、(d)2010年福島県沖の地震、
 (e)2011年三陸沖の地震。2011年三陸沖の地震のみ地震時の地殻変動と滑り分布のみを表示している。

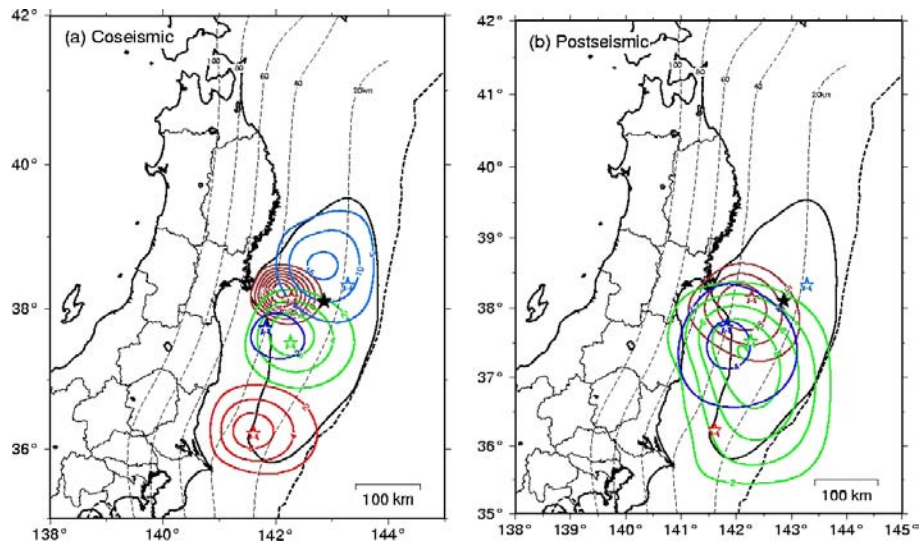


図6．図5に示した5つの地震の地震時および地震後の滑り分布と東北地方太平洋沖地震の震源域の比較。
 (a)地震時の滑り分布、(b)地震後の滑り分布(2011年三陸沖の地震は除く)

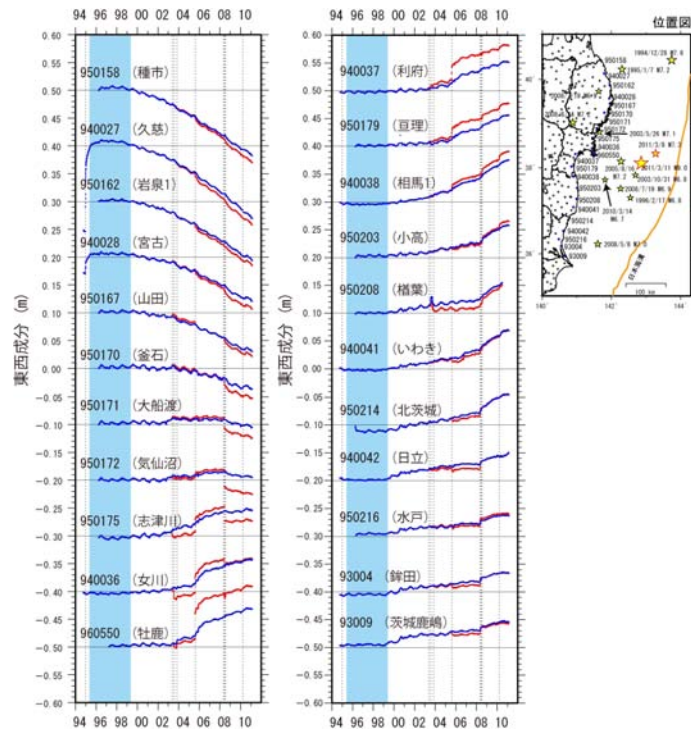


図 7 . 東北地方太平洋岸の観測点の非定常地殻変動時系列 (東西成分) 水色の期間 (1995 年 4 月 ~ 1999 年 3 月) でトレンドを推定し、除去している。赤はトレンドのみを除去した時系列。青は地震に伴うオフセットを除去した時系列。それぞれの時系列は 30 日間の移動中央値をとって平滑化している。

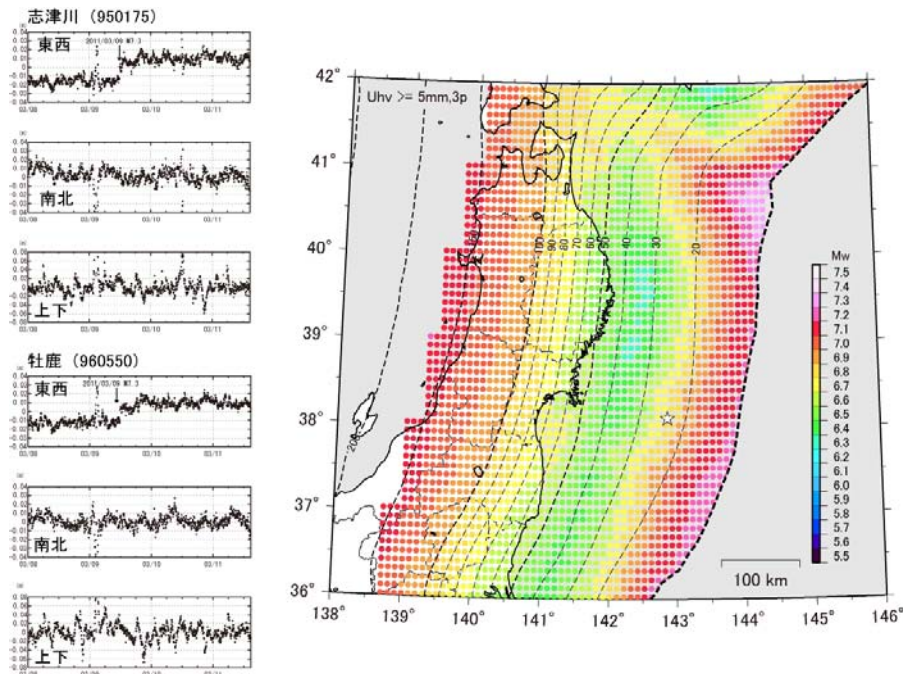


図 8 . 東北地方太平洋沖地震発生前の GPS キネマティック時系列 (左図) と日本海溝沿いのプレート境界面上での断層滑りの検知能力 (閾値 5mm 以上、観測点 3 点以上の場合)。

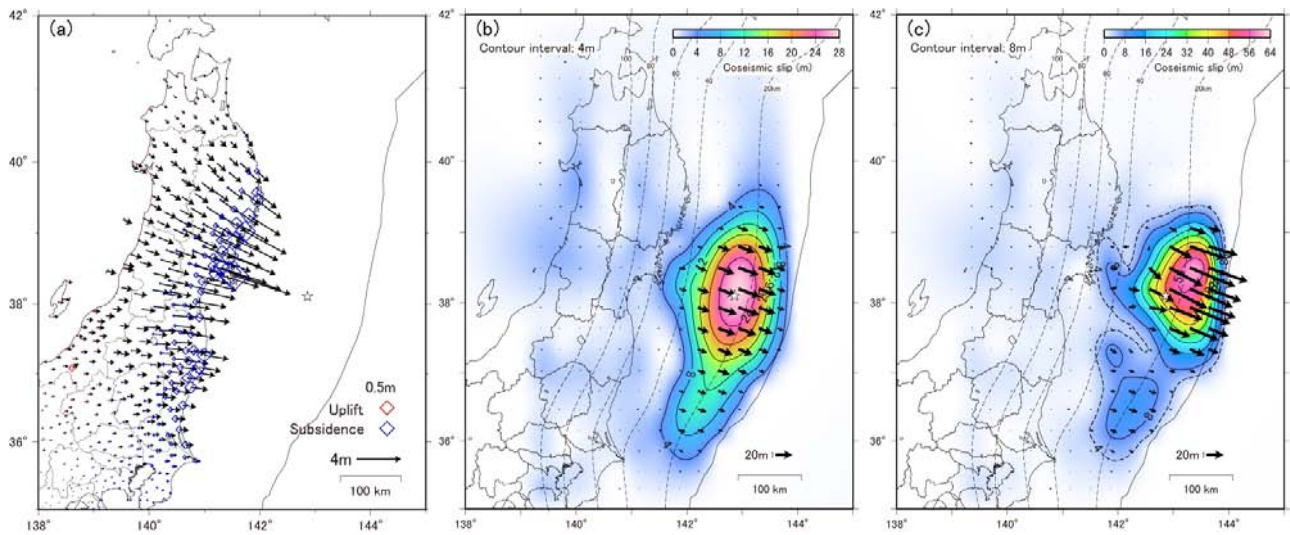


図9. GEONETによる東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動と本震時の滑り分布。
 (a)GEONETによる本震に伴う地殻変動。(b)GEONETデータから推定した本震時の滑り分布。(c)GEONETデータと海上保安庁による海底地殻変動観測点5点分のデータから推定した本震時の滑り分布。

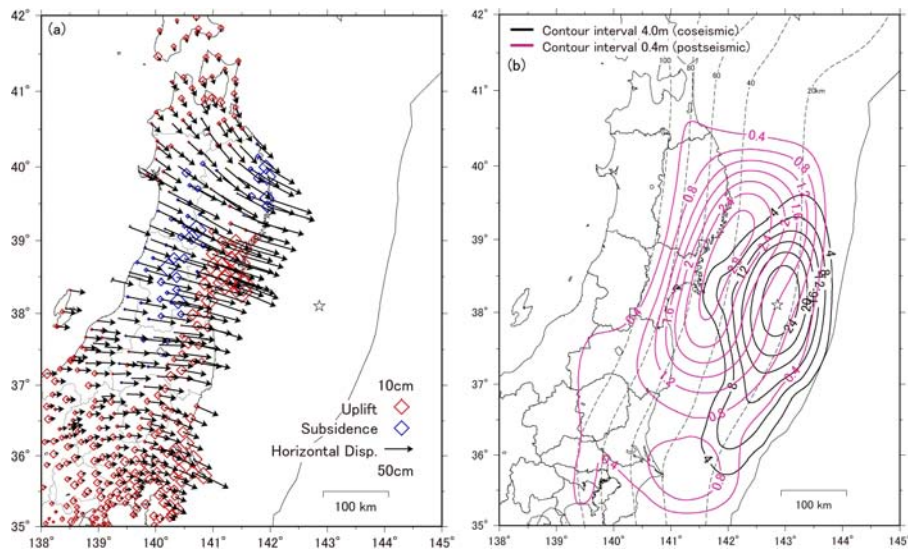


図10. 東北地方太平洋沖地震後の余効変動と余効滑り分布。
 2011年3月11日18時~2012年1月29日18時までのデータ。(a)GEONETによる余効変動。(b)余効滑り分布と本震時の滑り分布との比較。