

3. 2. 2 陸域構造調査

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 2 ヶ年の年次実施業務の要約
 - 1) 平成 24 年度
 - 2) 平成 25 年度

(2) 平成 25 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 観測点配置及びデータ収集
 - 2) データ解析
- (c) 業務の成果
 - 1) 2013 年 1 年間の変位場
 - 2) 2013 年 1 年間のひずみ場
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献

3. 2 地殻構造調査等

3. 2. 2 陸域構造調査

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 陸域構造調査

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人 東京大学地震研究所	教授	篠原 雅尚
国立大学法人 東北大学理学研究科	教授	三浦 哲
国立大学法人 東北大学理学研究科	助教	太田 雄策
国立大学法人 東北大学理学研究科	技術職員	出町 知嗣
国立大学法人 東北大学理学研究科	技術職員	立花 憲司

(c) 業務の目的

東北地方太平洋沖地震にともなうプレート境界深部での滑りが卓越した宮城沖・福島沖、及び最大余震が発生した茨城沖の陸上延長において、地殻構造探査を行いプレート境界断層の形状や地殻内の断層の形状などの海陸にわたる島弧構造断面を明らかにする。東北地方太平洋沖地震に伴う大規模な余効変動を空間的に高分解能で捉えることを目的として、稠密アレイ GPS 観測を陸域測線上で行うとともに、本調査で得られた詳細な構造を用いて余効変動について数値実験を行う。

(d) 2 ヶ年の年次実施業務の要約

1) 平成 24 年度 :

相馬-米沢間で海域の発震を受振するとともに、陸域で高エネルギー発震を行い、屈折法・反射法地震探査によって、海陸統合による島弧断面を得た。同時に測線沿いの活断層である双葉断層、福島盆地西縁断層帯を横切る反射法地震探査を行った。東北大学の宮城県北部にある既存の GPS 観測アレイを利用し、島弧を横断する石巻-酒田間、いわき-新潟間の 2 測線に、20 点の GPS 観測点を稠密に展開し、地殻変動観測を実施した。

2) 平成 25 年度 :

平成 24 年度に新設した稠密 GPS 観測網により得られている観測データを既存の国土地理院の GEONET 観測点や東北大学の GPS 連続観測点の観測データと併せて解析し、平成 26 年 1 月までの地殻変動を明らかにした。東北地方の水平変位ベクトルは概ね東北東方向を向いており、時系列パターンからも東北地方太平洋沖地震の余効変動が依然として支配的であることが明らかとなった。得られた変位ベクトルに基づいて面積ひずみ分布を求めたところ、太平洋沿岸や奥羽脊梁山脈沿いに収縮ひずみが卓越していることが判明した。

(2) 平成 25 年度の成果

(a) 業務の要約

東北地方太平洋沖地震の発生により、東北日本弧における応力場はそれ以前の東西方向の短縮場から伸張場へと反転した。また、プレート境界上では本震発生後約3年が経過した現在も大きな余効変動が継続している。これらの結果として、2011年4月11日の福島県浜通りを震源とするM7.0の直下型地震や、これまで顕著な地震活動がなかった地域で誘発地震を発生させている。こういった現象を定量的に理解するためには、現在進行中の地殻変動現象の時空間的特徴を詳細に明らかにすることが重要である。このため、宮城県石巻市から山形県酒田市に至る測線及び福島県いわき市から新潟市に至る測線上にGPS連続観測点を高密度に配置し（GPS稠密観測測線）、平成24年11月に地殻変動観測を開始した。平成26年1月31日までに得られた観測データから、周辺の既設のGEONET観測点のデータも併せて解析し、東北地方における地殻変動を詳細に調査した。解析によって得られた変位データをもとにひずみの各成分の分布を求めた結果、平成25年1年間の面積ひずみは本震震源域に近い太平洋沿岸域及び奥羽脊梁山脈で収縮傾向を示しているのに対して、それ以外の領域では依然として膨張傾向にあることが判明した。

(b) 業務の実施方法

1) 観測点配置及びデータ収集

本研究テーマでは、東北日本の前弧域から火山フロントを超えて日本海側に至る2本のGPS稠密観測線、すなわち石巻-酒田測線及びいわき-新潟測線を構築した。図1に観測点配置を示す。GPS観測では、GPS衛星からの微弱なLバンド帯（1～2GHz）の電波を受信するため、上空の視界が開けている必要があり、アンテナ位置の変動が地盤そのものの変動に直結している必要がある。このため、これらの条件を満足する小中学校の校舎や地方自治体の庁舎の屋上を中心にして観測点選定を行った。

各観測点に設置されたGPS受信機で取得された観測データは、一旦LANで接続されたデータロギング用PCに1秒及び30秒サンプリングで収録されている。後者のデータは、東京大学地震研究所に設置されたデータ収録装置からの呼出により1日1回伝送される。前者は、大地震等のイベントがあったときのみ、手動により収集が行われ、過去約1年分のデータがPC内に保持される。本システムは出町・他（2011）に基づいており、データ伝送には携帯電話を用いたインターネット網を利用している。

2) データ解析

GPS解析には、米国航空宇宙局（NASA）のジェット推進研究所（Jet Propulsion Laboratory, JPL）によって開発されているソフトウェアGIPSY-OASIS II（GNSS Inferred Positioning SYstem/ Orbit Analysis and SIMulation Software, Lichten and Border, 1987）version 6.0を使用し、精密単独測位法（Zumberge *et al.*, 1997）によって各観測点の日座標値推定を行った。解析の際の衛星軌道・時計情報には、JPL再解析精密暦を使用した。大気遅延量推定においては、天頂大気遅延量（Zenith Total Delay, ZTD）を推定し、各衛星の視線方向の遅延量への変換はマッピング関数を用いて重み付けを行った。マッピング関数としては、GMF（Global Mapping Functions, Boehm *et al.*, 2006）を使用した。解析時の衛星の仰角カ

ットオフは 7° とした。

得られた各観測点の時系列には短周期ノイズが含まれるため、本研究では遮断周期90日の低域透過フィルター (LPF) をかけてエイリアシングを防止し、任意の観測日間の変位場を得られるようにした。また、得られた各観測点における変位に対して、Shen *et al.* (1996) の方法を適用して連続的なひずみ各成分の分布を求めた。

(c) 業務の成果

1) 2013年1年間の変位場

図2に本研究により新設された観測点の座標値各成分の時系列を示す。図中各時系列に観測点コードが付記してあるが、数字のみ4桁の観測点は GEONET 観測点のものである。本研究により新設された観測点の時系列と GEONET 観測点の時系列を比較しても、特に大きな遜色はない。図3には図2の時系列に対して、遮断周期90日の低域透過フィルター (LPF) をかけた結果を示す。こうすることにより、短周期変動が抑制されエイリアシングを起こすことなく任意の日付間の変位が得られる。図4、5に2013年1月1日から12月31日までの1年間の水平及び上下変位ベクトルを示す。基準座標系は ITRF2008 であるため、プレート運動も含んだ変位場となっているが、殆どの観測点で東南東方向の変位となっており、東北地方太平洋沖地震の余効変動が支配的であることを示している。なお、水平変位の大きさは北側で大きく、南側で小さい。このような特徴を詳しく見るために、変位の各成分毎の分布を図6～8に示した。東向き変位は岩手県・宮城県北部で大きく、その範囲から離れるにしたがって同心円状に小さくなっているように見える。北向き変位も同様であるが、福島県沿岸域で南向き成分がやや大きい。上下成分を見ると、太平洋沿岸で隆起、日本海沿岸でやや隆起を示しているのに対し、内陸部では沈降傾向となっている。

2) 2013年1年間のひずみ場

Shen *et al.* (1996) の方法により、格子点上で計算された主ひずみの分布を図9に示す。主ひずみの分布には地域的な特徴があり、北緯 39.7° 以北では北西-南東方向の伸張、北東-南西方向の短縮が卓越しており、ひずみ量は脊梁山脈周辺で極大で太平洋沿岸では小さくなっている。北緯 39.5° 以南の三陸沿岸域は、西北西-東南東方向の短縮ひずみで特徴付けられる。また、北緯 38° から 39.5° の範囲の脊梁山脈周辺では南北方向の短縮ひずみが顕著である。北緯 39.5° 以南の日本海沿岸では概ね東西方向の伸張ひずみが特徴的である。なお、阿武隈山地周辺では、ひずみ量そのものが小さい傾向が見られる。

図10にShen *et al.* (1996) の方法により得られた2013年1年間の面積ひずみ分布を示す。北緯 39.5° 付近までの太平洋沿岸で収縮ひずみが顕著である。これとは別に北緯 40° 付近までの脊梁山脈沿いにも収縮ひずみの大きな領域が見られる。この領域は、東北地方太平洋沖地震発生前の1997年から2001年の5年間のGPS連続観測データを用いた解析により、Miura *et al.* (2004) により指摘されている東西方向の短縮ひずみの集中帯と概ね一致している。

面積ひずみの膨張域と収縮域の時間発展を見るため、2011年4月1日から2012年3月31日までの1年間、2012年及び2013年の1年間について、図11に並べて示した。これによると、太平洋沿岸南部の収縮域は地震直後の1年間(図11左)から既に見られており、宮城・

山形県境周辺でも脊梁山脈沿いに収縮域が現れている。その後、2012年、2013年と経過するにしたがって、太平洋沿岸の収縮域は南側へは拡大傾向にあるが、北側には岩手県宮古市周辺あたりで拡大傾向は止まっているように見える。また、収縮ひずみ量は時間の経過と共に小さくなっている。東北地方太平洋沖地震やそれに引き続く余効滑りといった逆断層滑りを仮定した場合、その上盤側の弾性変形においては膨張ひずみが卓越するが、粘弾性変形においては収縮ひずみとなる場合もあり得る。したがって、現在観測されているひずみ場では、余効滑りよりも粘弾性変形によるものが支配的である可能性が考えられる。

一方、脊梁山脈沿いの収縮域は時間と共に明らかに南北方向に拡大している様子が見られ、収縮ひずみ量には大きな変化がない。この収縮域の北端は、2013年末までの期間では、八幡平や秋田焼山付近までに限られている。ここからさらに北側の火山フロント沿いには、十和田や八甲田といった火山が存在するが、この領域では逆に膨張ひずみが局在しているように見える。特に八甲田山周辺では東北地方太平洋沖地震発生後に浅発地震活動が活発化しており、火山活動に関連すると考えられる長周期地震なども発生している。こういった現象と上述のひずみ分布の特徴に関連があるかどうかについては今のところ不明であるが、今後の地震及び火山活動やひずみ変化をみながら検討していく必要がある。

本研究で明らかとなった脊梁山脈沿いの収縮ひずみ域が、東北地方太平洋沖地震発生以前に指摘されていた東西短縮ひずみの集中域と概ね一致している点は特に注目に値する。震源域に近い太平洋沿岸域とは地理的に隔たっている点や、上述のように時間発展の特徴が異なっている点等も勘案すると、この収縮ひずみ域は、この領域特有の局所的な地下構造、特に粘性構造に起因する可能性が高いと考えられる。本研究で得られた変形特性に基づいて、今後数値シミュレーション等を併用しながら、東北地方太平洋沖地震に対する地殻・上部マントル応答の解明を進める必要がある。

(d) 結論ならびに今後の課題

東北地方太平洋沖地震の影響は、少なくとも今後数10年間にわたって継続し、下部地殻・マントルでの粘性緩和は地殻上部へ応力を伝搬し、被害地震が発生する可能性が危惧される。こうした状況の下で、応力伝播モデルを構築し、震源断層の形状をもとに地震発生のパテンシャルを評価していくことは喫緊の課題である。こうした背景から本研究では、稠密なGPS観測を実施し、東北地方の現在の地殻変形過程を明らかにした。

今後、こうした情報を長期にわたって収集することにより、より精度の高い地殻・上部マントル応答モデルを構築し、東北地方太平洋沖地震後の応力変化による活動性の評価を行っていく必要がある。

(e) 引用文献

Boehm J, Niell A, Tregoning P, Schuh H, 2006, Global Mapping Function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophys Res Lett* **33**:L07304. doi:10.1029/2005GL025546.

出町知嗣・立花憲司・太田雄策・三浦哲・植木真人・長谷見晶子・鹿目靖雄・松島健，
プリペイド携帯電話通信端末を利用したGPS連続観測，日本地球惑星科学連合2011年大会，千葉市，幕張メッセ，2011年5月。

- Lichten, S., and J. Border, 1987, Strategies for high-precision Global Positioning System orbit determination, *J. Geophys. Res.*, **92**, 12,751-12,762.
- Miura, S., T. Sato, A. Hasegawa, Y. Suwa, K. Tachibana and S. Yui, 2004, Strain concentration zone along the volcanic front derived by GPS observations in NE Japan arc, *Earth Planets Space*, **56**, 1347-1355.
- Shen, Z.-K., Jackson, D. D. & Ge, B. X., 1996, Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements, *J. geophys. Res.*, **101**(B12), 27 957-27 980.
- Zumberge, J., M. Heflin, D. Jefferson, M. Watkins, and F. Webb, 1997, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, **102**, 5005-5018.

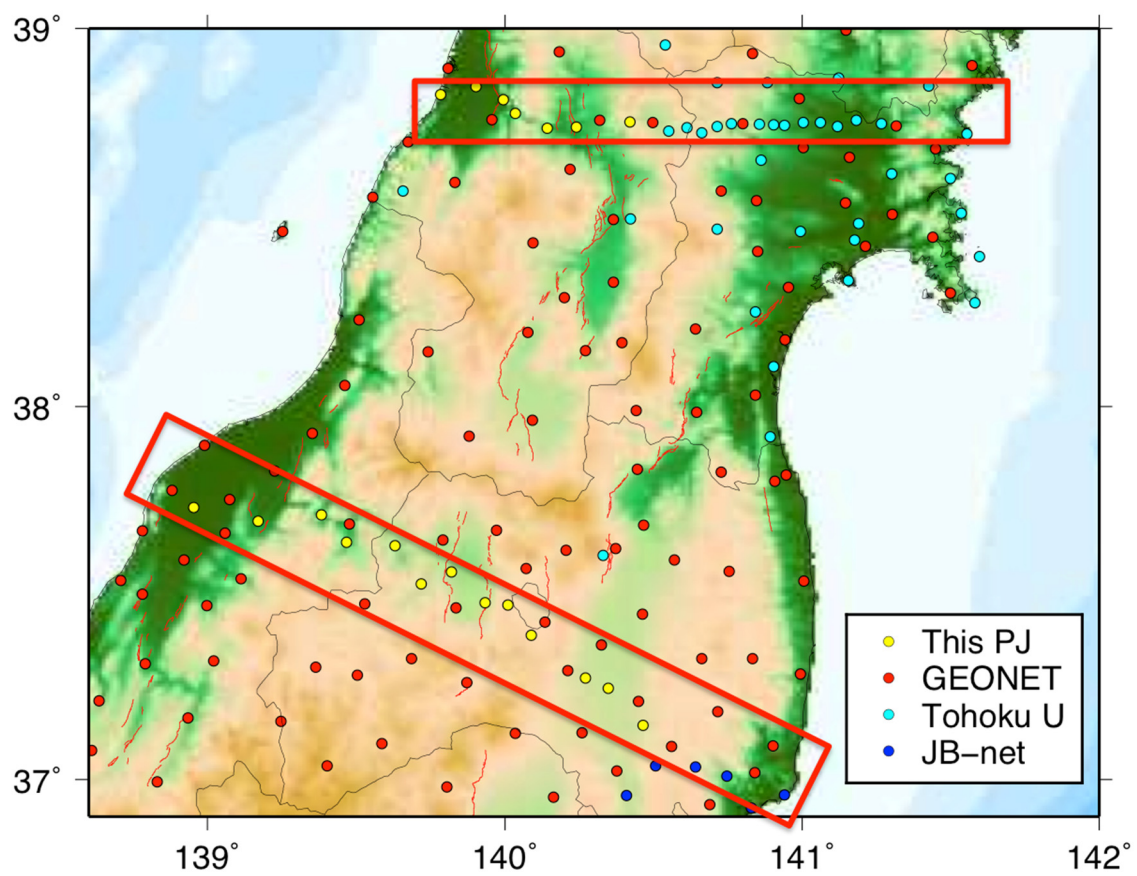


図1 本研究によって設置された観測点の配置図（黄色丸）。赤丸は国土地理院のGEONET観測点、水色丸は東北大学の観測点、青丸は東京大学地震研究所の観測点を示す。

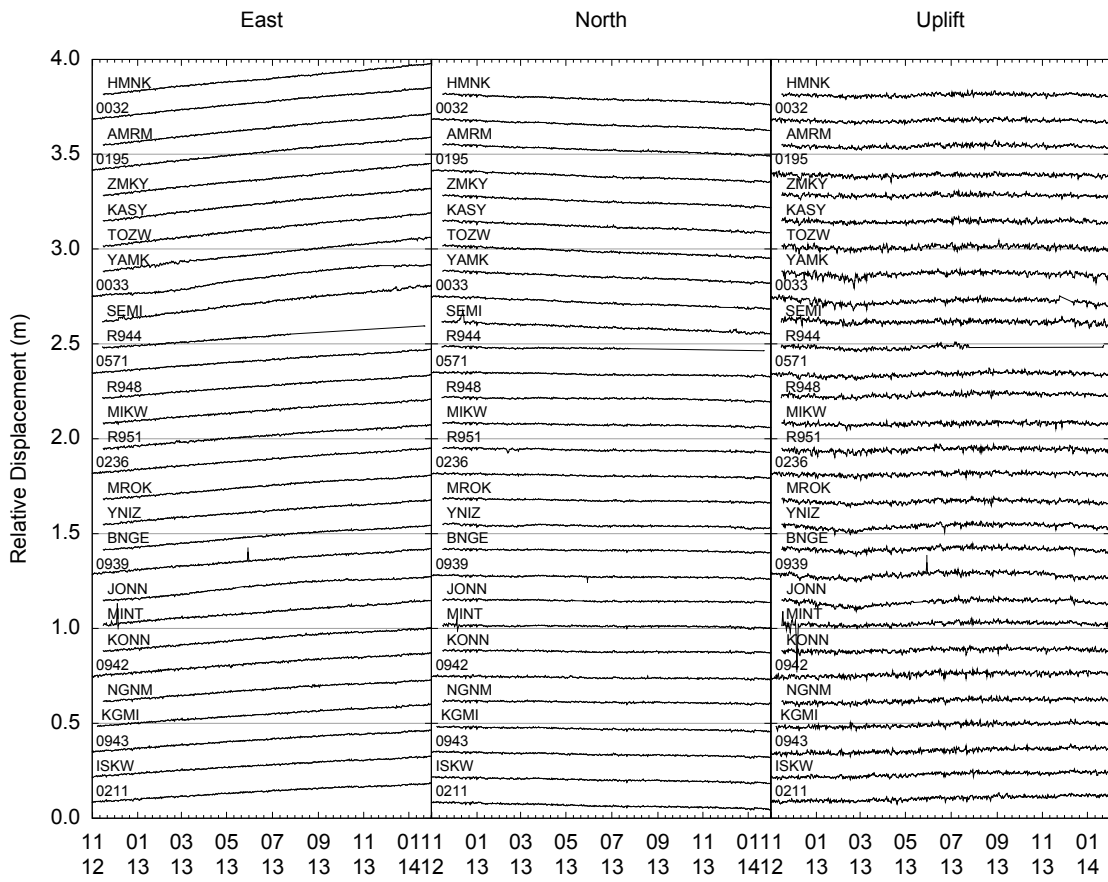


図2 本研究によって設置された観測点及び GEONET 観測点における座標値各成分の時系列。左から東、北、上の各成分を示す。図中各時系列に観測点コードが付記してあるが、数字のみ4桁の観測点は国土地理院の GEONET 観測点のものである。

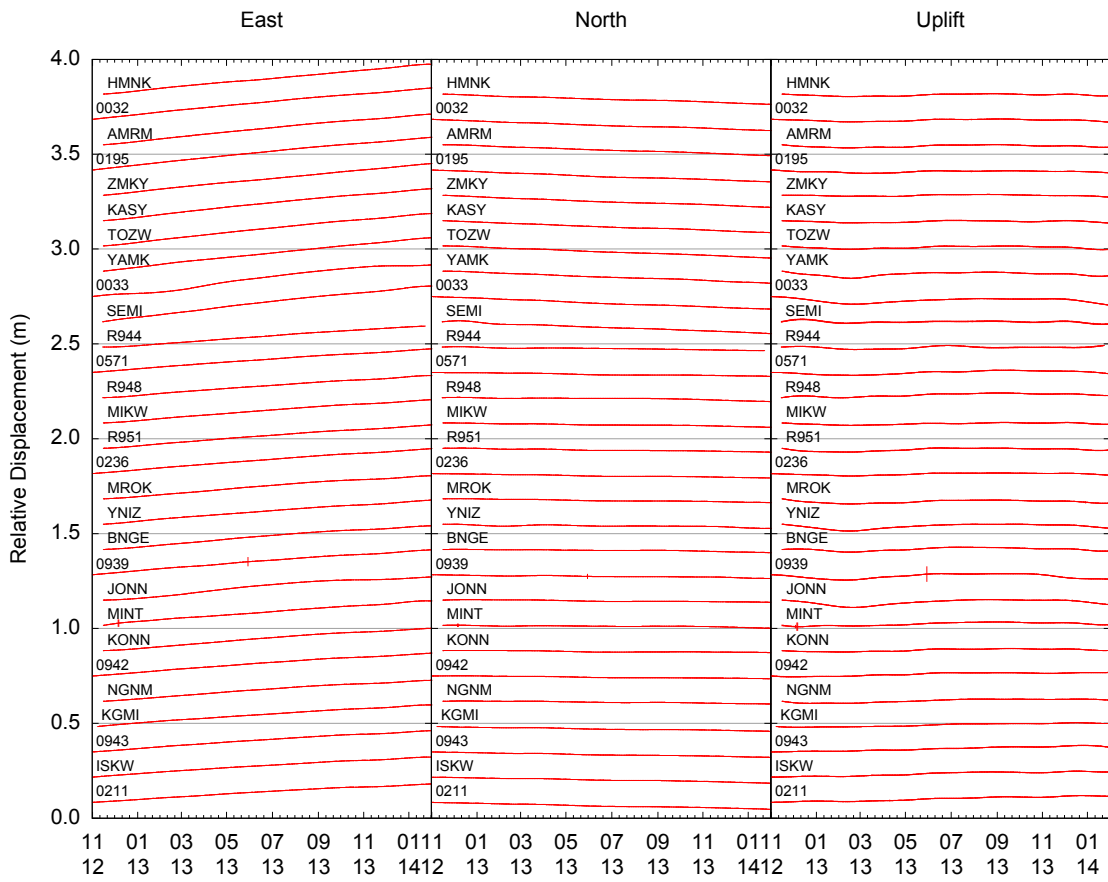


図3 図2と同じ、ただし遮断周期90日の低域透過フィルターをかけた結果を示す。

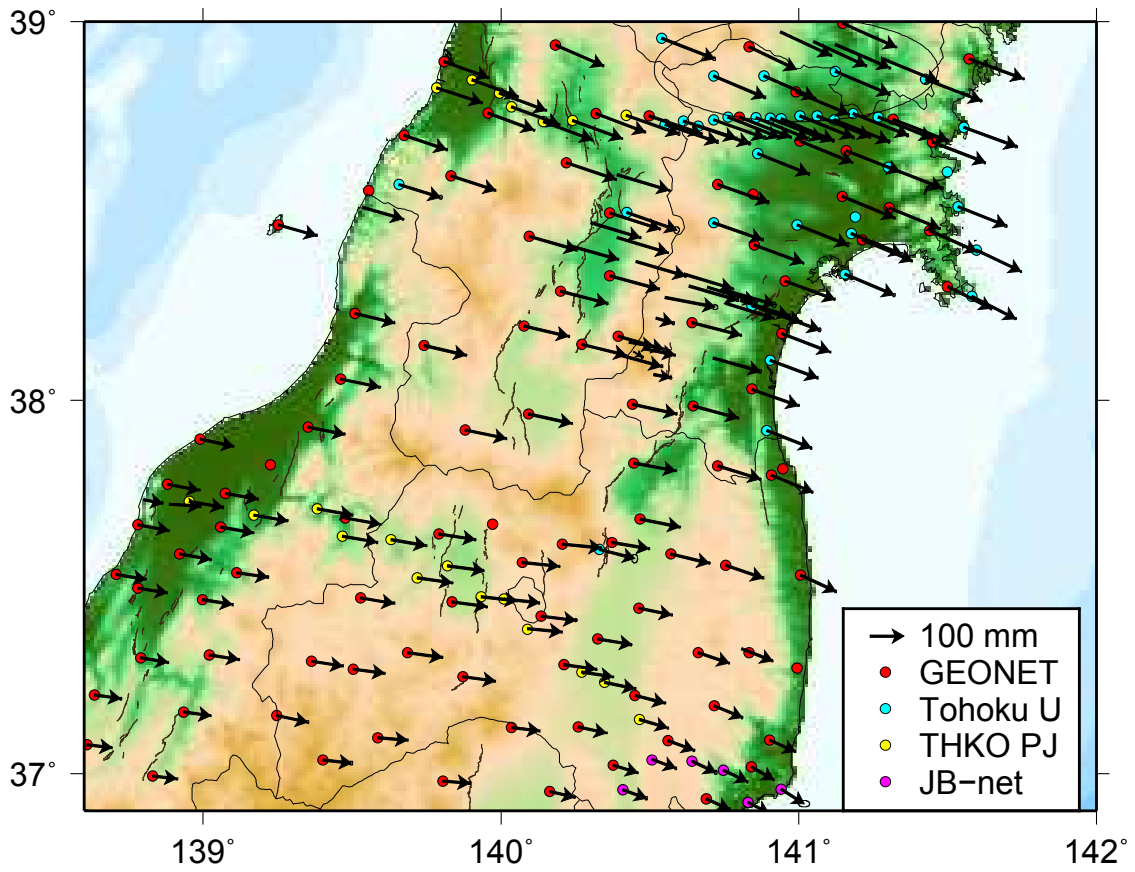


図4 本研究により設置された GPS 稠密観測線周辺の水平変位ベクトル。
 期間は 2013 年 1 年間を示す。

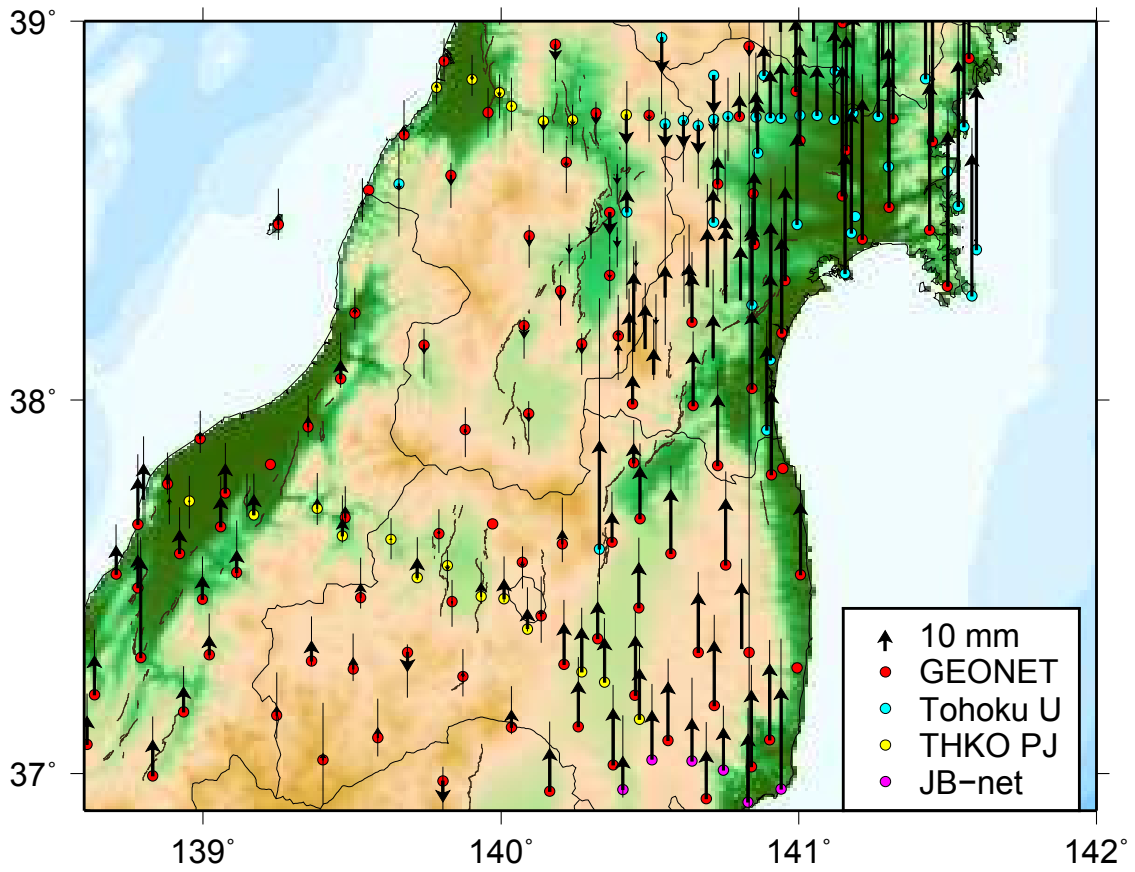


図5 図4と同じ。ただし上下変位成分を示す。

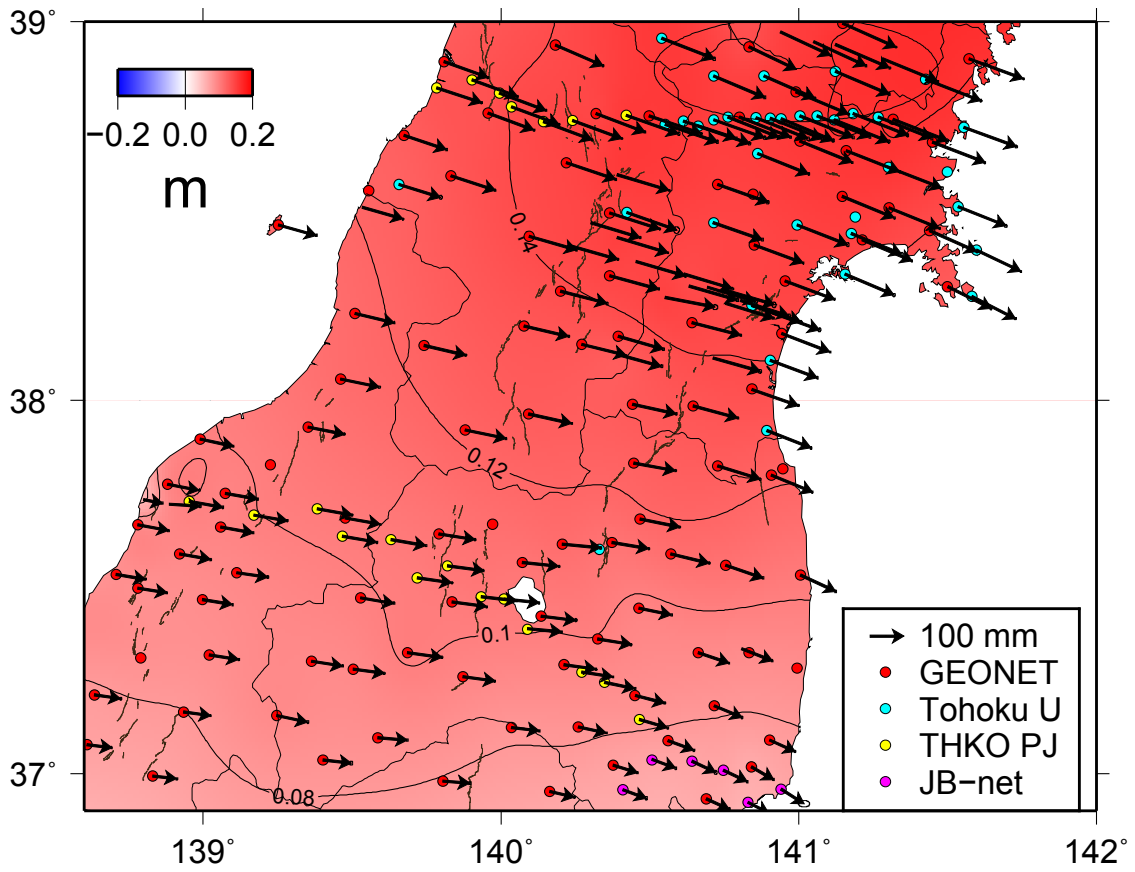


図6 図4と同じ。ただし背景のカラーコンターは東向きの変位成分の大きさを示す。

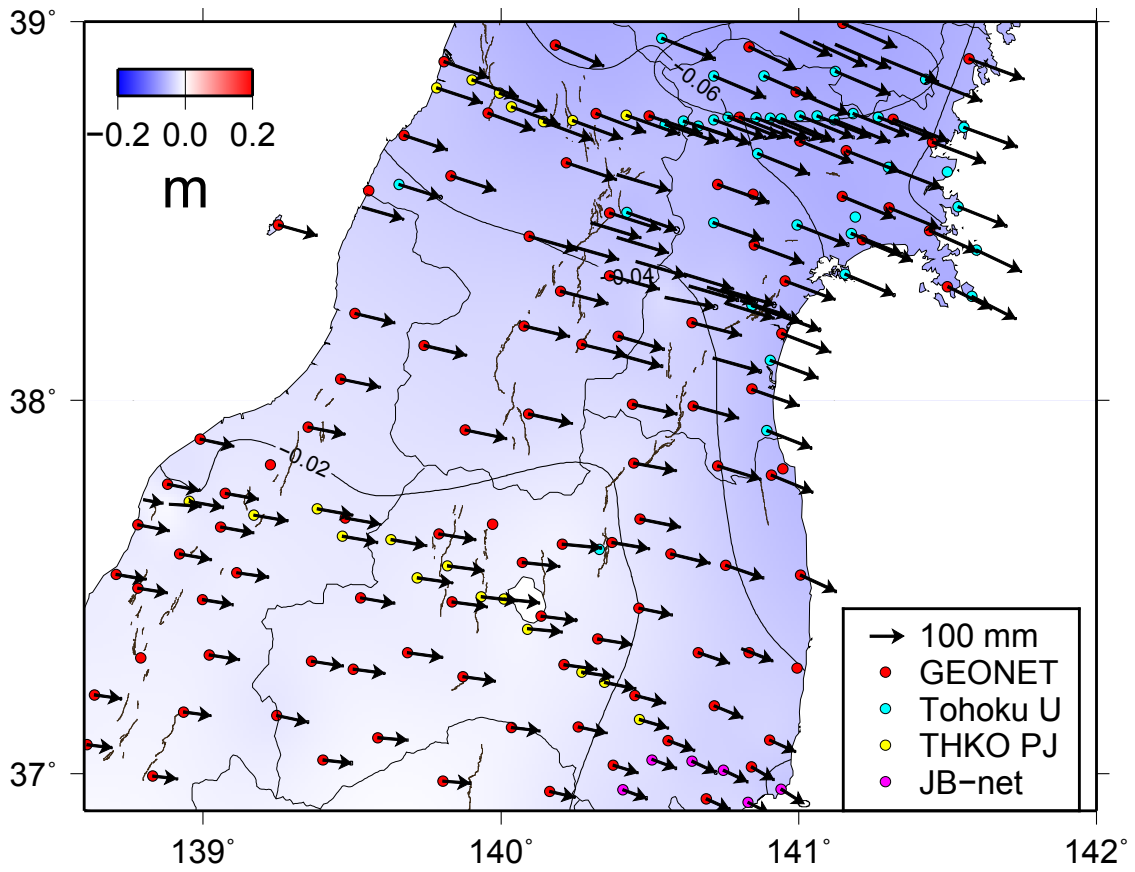


図7 図4と同じ。ただし背景のカラーコンターは北向きの変位成分の大きさを示す。

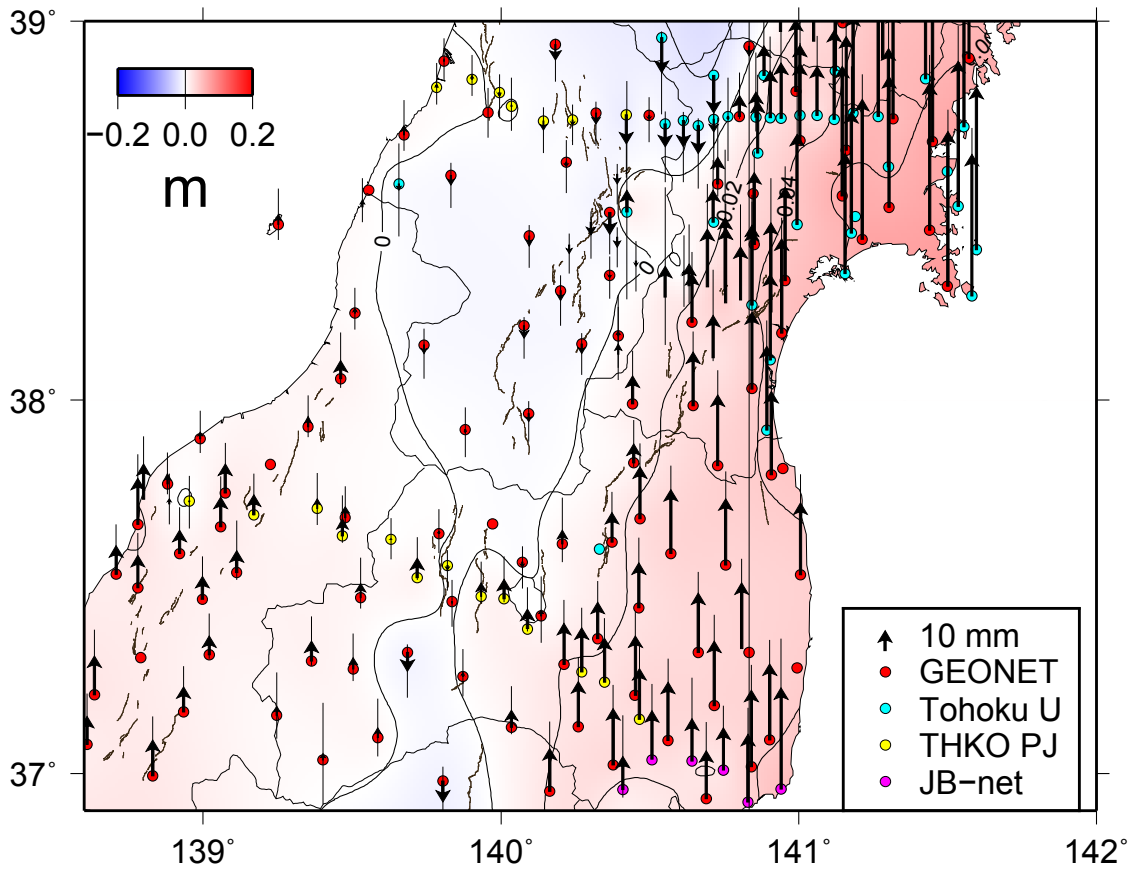


図8 図4と同じ。ただし背景のカラーコンターは上下変位成分の大きさを示す。

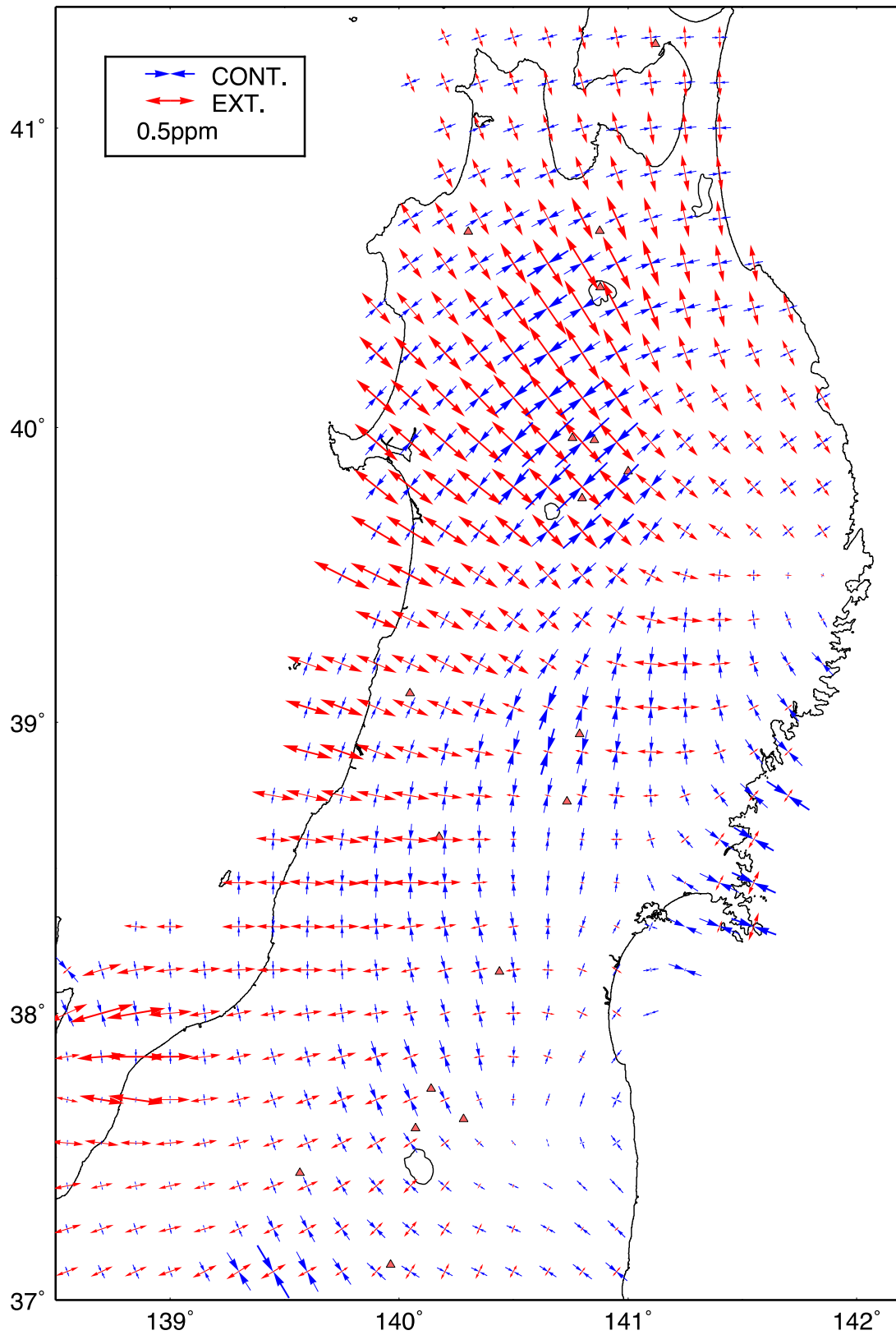


図9 Shen *et al.* (1996) の方法により格子点上で計算された主ひずみの分布。期間は2013年1年間である。赤が伸張、青が短縮ひずみを示す。

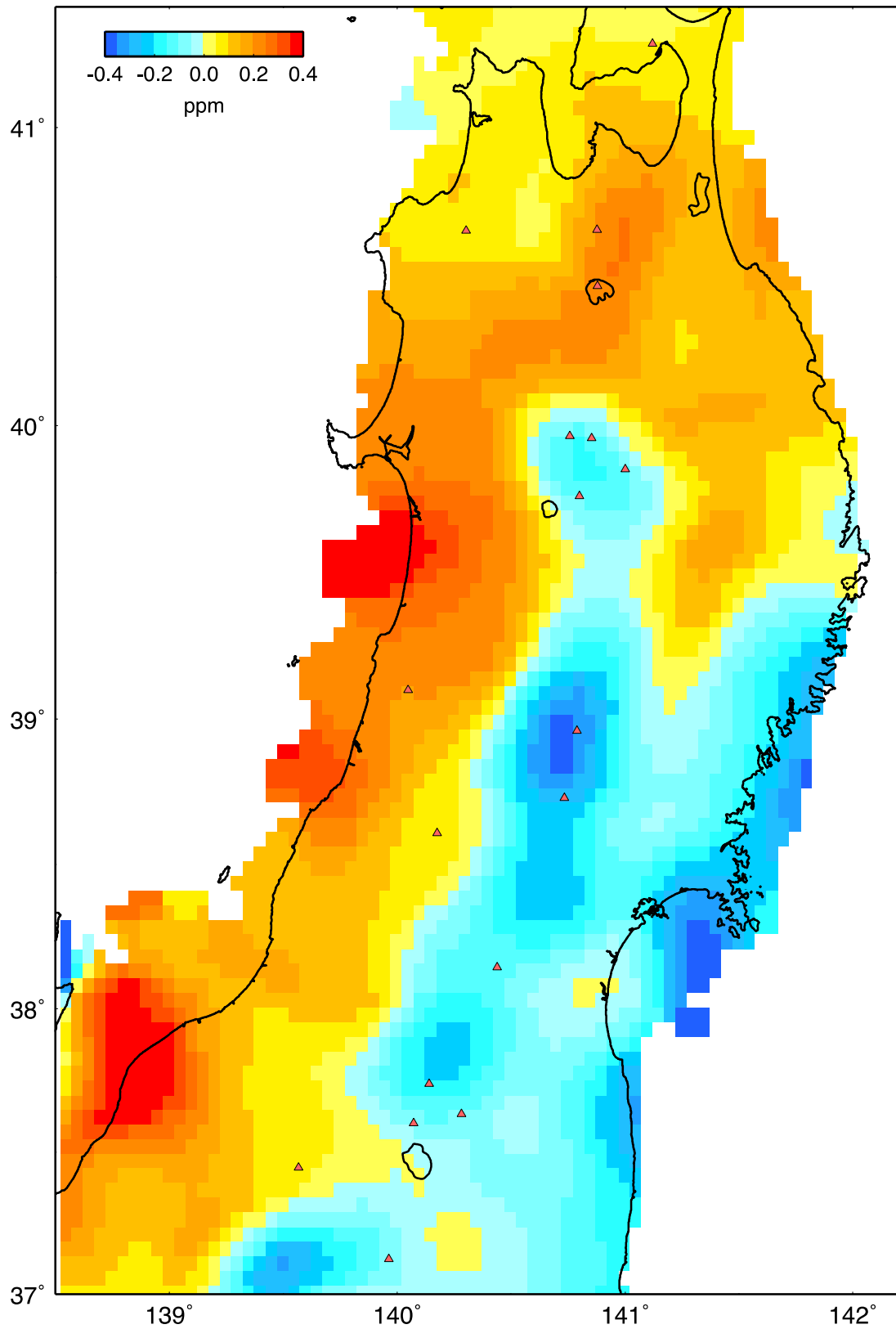


図 10 図 9 に同じ。ただし面積ひずみの分布を示す。暖色系が膨張、寒色系が収縮を示す。

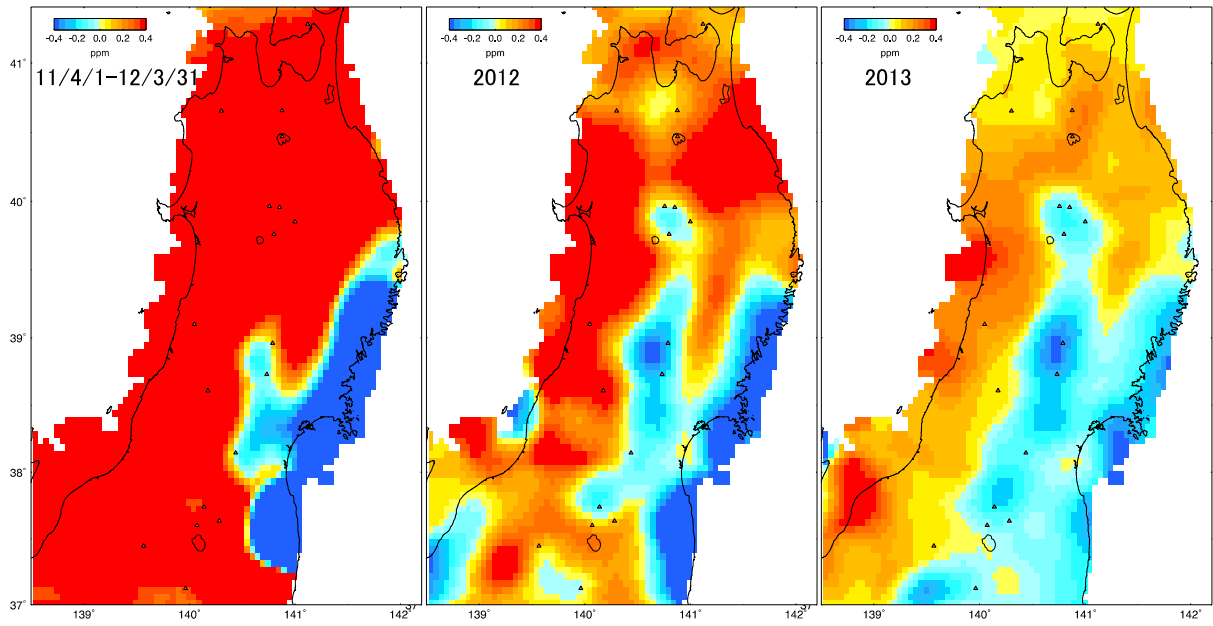


図 11 面積ひずみ分布の時間的変化。左から 2011 年 4 月 1 日から 2012 年 3 月 31 日、2012 年 1 月 1 日から同年 12 月 31 日まで、2013 年 1 月 1 日から同年 12 月 31 日までの各 1 年間を示す。