

第 190 回 地震予知連絡会



2011 年 4 月 26 日

東北大学大学院理学研究科

1-1. GPS 観測から得られたすべり量分布

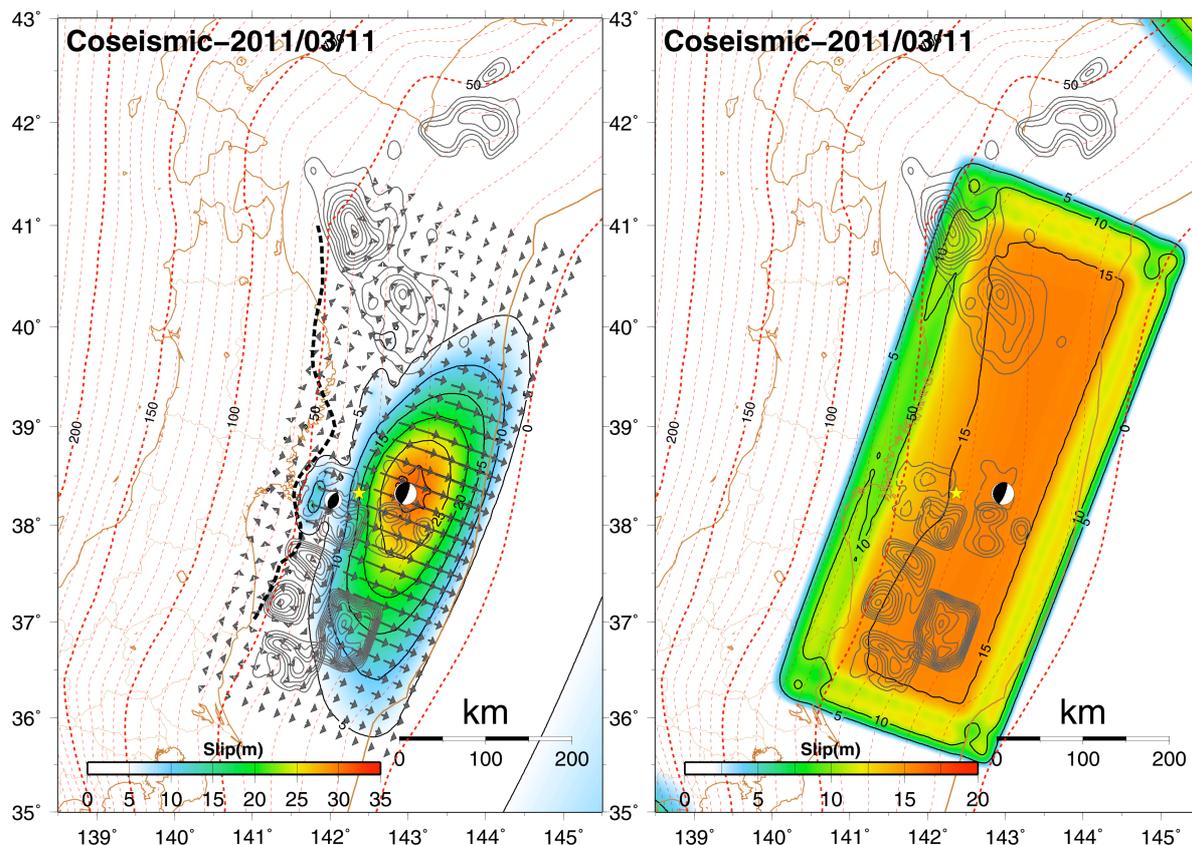


図1(左)：陸上GPS観測点で得られた地震時変位分布から推定されたプレート境界面上での地震時すべり分布。プレート境界モデルはNakajima and Hasegawa (2006)のものを用いた。解析はInuma (2009)による、Matsu'ura et al. (2007)を改良した、ABIC最小化による拘束条件の重みを最適化するインバージョン手法を用いて行った。水平成分・上下成分ともに同じ重みで用いているが、GEONET田老の観測値のみ、周囲に比して特異な動きをしていたため、重みを下げている。すべり分布の等値線間隔は5m。紫の実線で囲まれた範囲及び紫の矢印は、解析誤差を超える値が推定されている範囲及びすべりベクトルを示す。本震及び4月7日の余震のメカニズム解(USGS,W-phase解析によるもの)を震源球で、本震震央を黄色の星で示す。黒の破線はIgarashi et al.(2001)による低角逆断層型地震の西縁線。灰色の等値線は過去の大地震の破壊域を示す。2003年十勝沖、1968年十勝沖、1978年宮城県沖、1981年宮城県沖、1936年宮城県沖、2003年福島県沖、1938年塩屋崎沖についてプロットしてある(Yamanaka and Kikuchi, 2003, 2004; 室谷, 2003)。最大すべり量は約35m、また、宮城県沖深部では最大19mのすべりが推定された。主破壊域はプレート境界深度30km以浅にあり、上盤側が地殻になっている部分と対応していると考えられる。1968年の十勝沖地震の震源域には破壊は及んでいない。

(右)：推定誤差の空間分布。等値線間隔は5m。

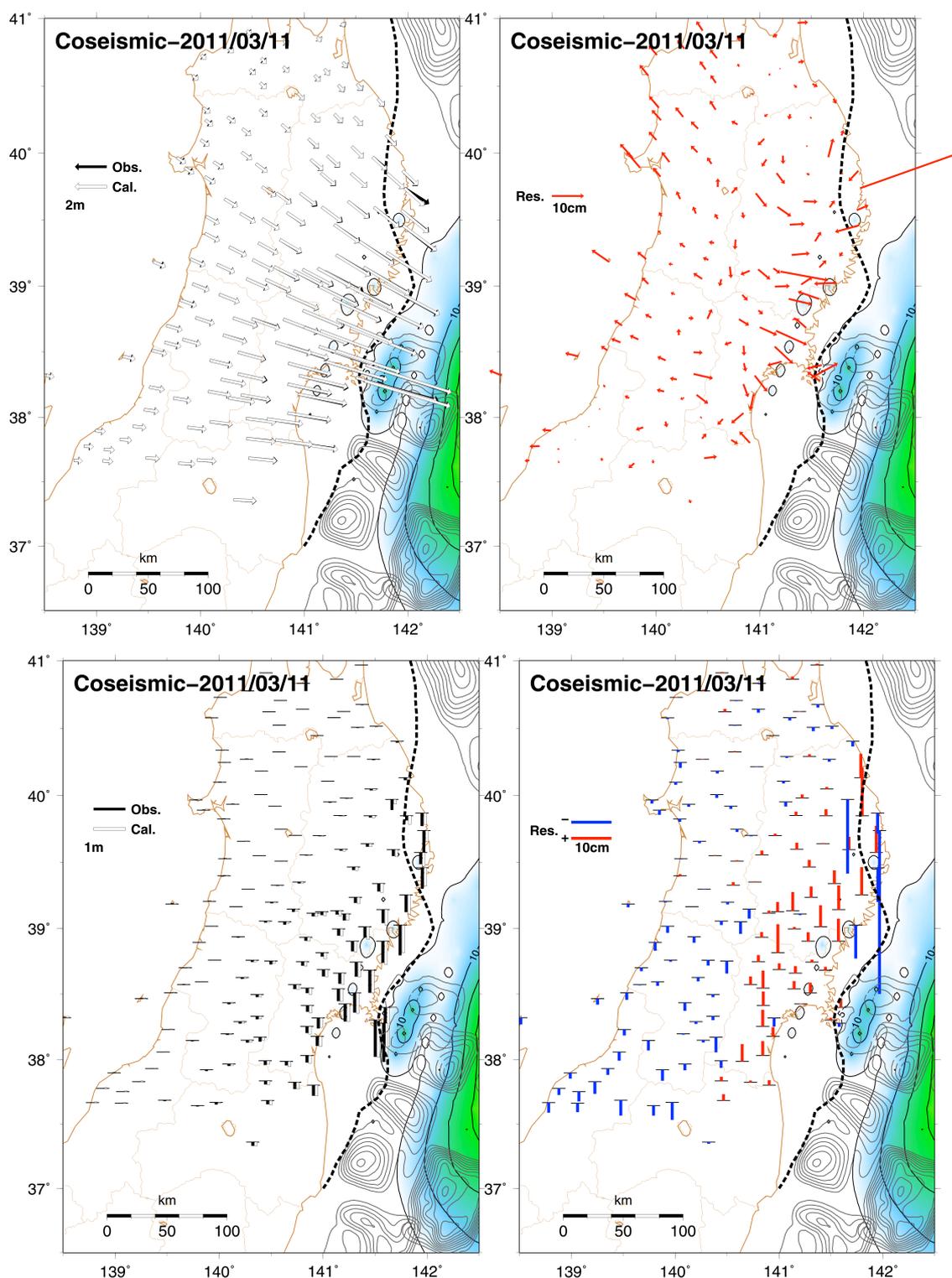


図 2 : 観測された変位と推定された地震時すべり分布から計算される変位との比較。

(左上) : 水平成分. 黒塗りが観測値, 白抜きが計算値. 固定点は GEONET の三隅(島根県浜田市).

(右上) : 水平成分の残差.

(左下) : 上下成分. 黒塗りが観測値, 白抜きが計算値. 固定点は GEONET の三隅(島根県浜田市)

(右下) : 上下成分の残差. 赤は観測値が計算値より大きいことを, 青は観測値が計算値より小さいことを示す.

すなわち, 赤は計算値が沈降過剰もしくは隆起不足, 青は計算値が沈降不測もしくは隆起過剰であることを示している。

1-2 (a). 海底圧力計により捉えられた 2011 年東北地方太平洋沖地震に

伴う海底地殻上下変動

2011 年東北地方太平洋沖地震 M9.0 が発生した 3 月 11 日時点で、その震源域内では、東京大学の三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムを含む複数の観測点において、海底圧力の連続観測が行われていた。ここでは、三陸沖ケーブルシステムの 2 観測点と、宮城県はるか沖に設置されていた自己浮上式海底圧力計 1 観測点（図 1-2-1）で捉えられた地震時地殻変動について報告する。

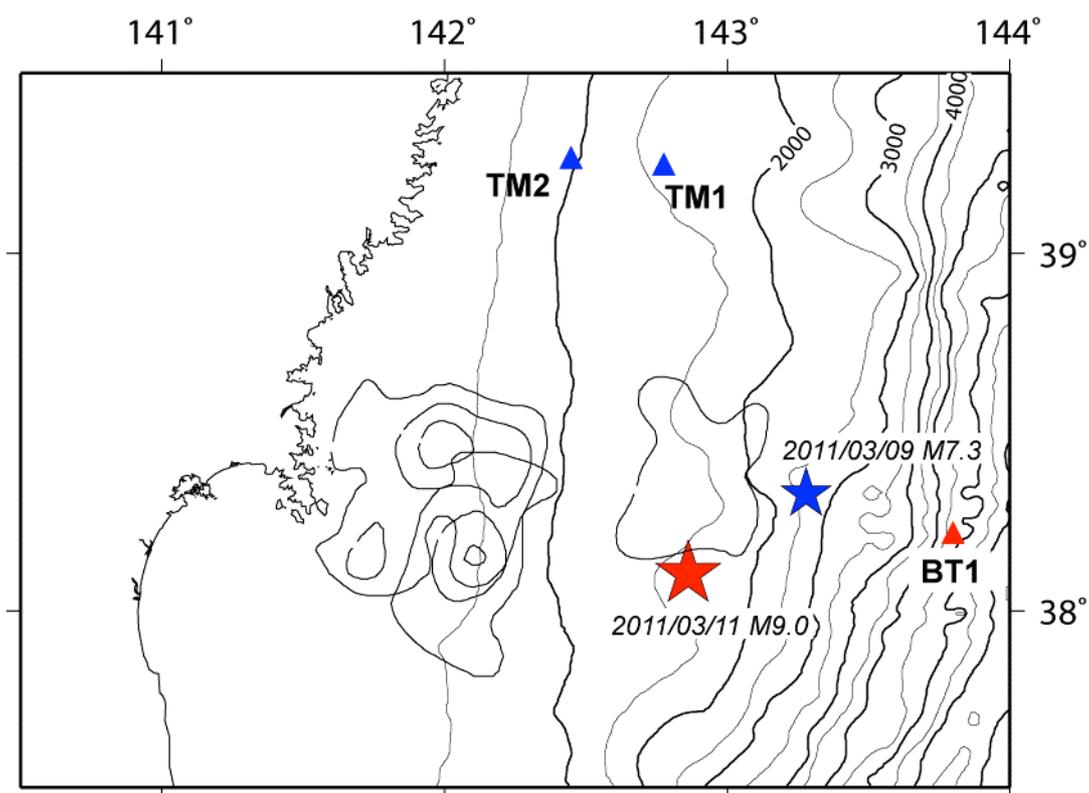


図 1-2-1. 海底圧力観測点の配置図. TM1 と TM2 は三陸沖ケーブルシステムの津波観測点. BT1 は自己浮上式海底圧力計.

図 1-2-2 は三陸沖ケーブルシステムの津波計で捉えられた海底圧力変動の記録である。10Hz サンプルの生データに対して 60 秒の移動平均を施した後、NAO.99Jb[Matsumoto et al., 2000]に基づく理論潮汐による圧力変動を取り除いたものである。地震が発生した後、相対水位は次第に上昇し、5m に及ぶ大きな波高の津波を記録した後、地震発生からの経過時間が 30 分程度で相対水位は一定値に近づくように見え、この相対水位が 2 観測点における海底上下変動量を反映している可能性がある。TM1 では 0.8m 程度、TM2 では 0.3m 程度の水位の上昇であり、それぞれの量の海底の沈降に対応する。ただし、三陸沖ケーブルシステムは陸揚げ局の被災により 15:17 頃からデータが途絶しているため、正確な地殻変動量の見積もりは困難である。

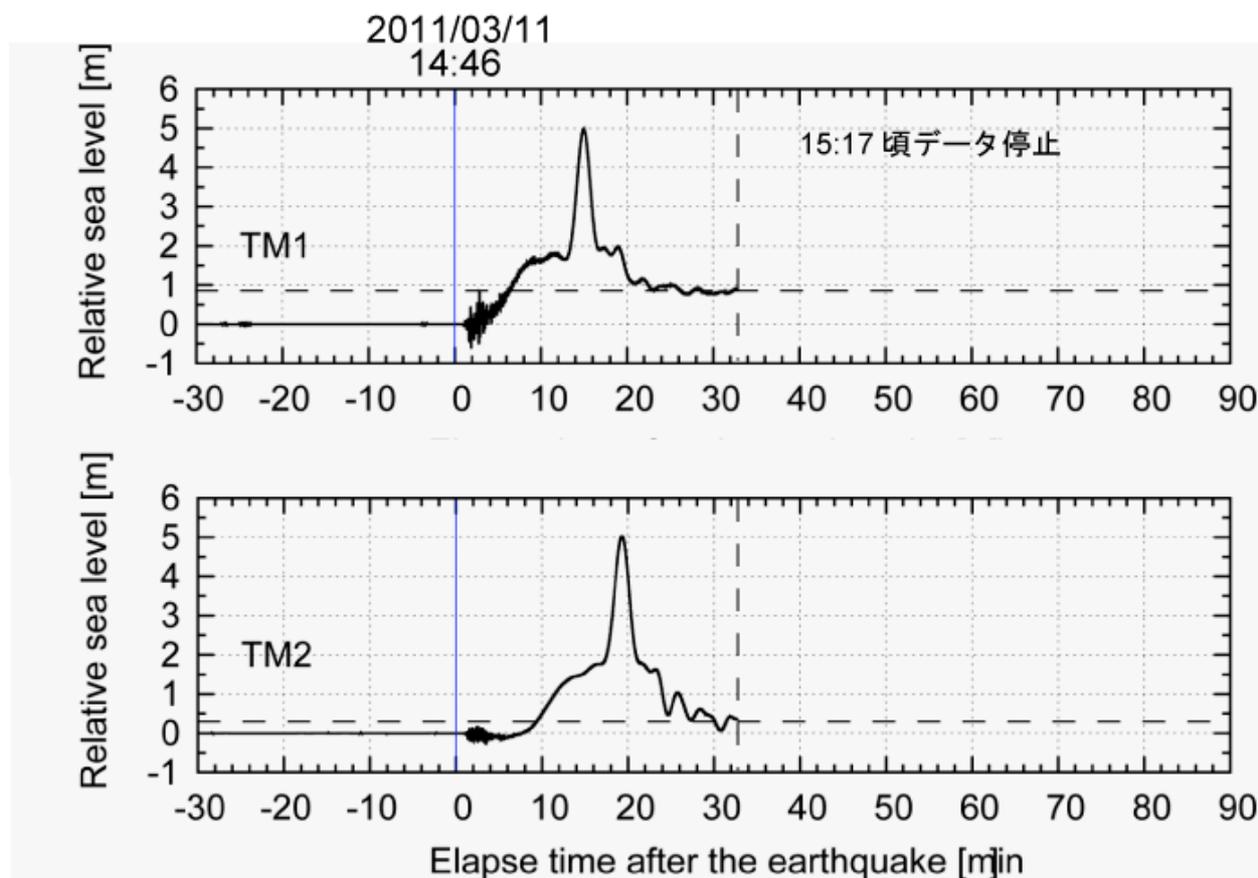


図 1-2-2. 三陸沖ケーブルシステムの海底津波観測点 TM1 および TM2 で捉えられた圧力変動.

1-2 (b). GPS 音響結合式海底地殻変動観測により捉えられた

2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う海底地殻変動

2011 年東北地方太平洋沖地震 M9.0 の震源域に含まれる宮城県沖海域では、2 観測点に GPS 音響結合式海底地殻変動観測のための海底基準局が設置されている。ここでは、これら 2 観測点において 2010 年 11 月において実施した測量と 2011 年 4 月に実施した測量結果の差から、地震時変動量を求めた。観測点 GJT3 では、東向き変位量が 29 m、南向き変位量は 11 m で、水平変動量は 31 m (± 1 m) と推定された。GJT4 での東向き変位量は 14 m、南向き変位量は 5 m で、水平変動量は 15 m (± 1 m) であった。さらに、上下方向の変位も認められ、GJT3 では 5 m (± 2 m) の隆起、GJT4 では、3.5 m (± 2 m) の隆起であった。推定誤差が通常の観測 (\sim 数 cm) より大きいのは、観測時間が極端に制限されていたためと、応答しない海底局があったためである。

なお、GJT3 および GJT4 はいずれも、3/9 に発生した M7.3 の前震の震源域に近いこと、ここで測定された変動量は前震に伴う地震時変動とその余効変動の影響を含む。M7.3 の断層モデル（東北大・別報告）によれば、GJT3 および GJT4 での前震にともなう地震時水平変動量は、それぞれ 22 cm、5 cm となり、現時点での計測誤差以下である。余効変動はさらに小さいと考えられる。一方、今回の観測は、M9.0 の本震発生後 1 ヶ月後に実施されたものであるため、相当規模の余効変動の影響を含む。GJT3 では海底圧力の連続観測を実施しているため、今後は、その時系列を用いて本震時変動と余効変動の分離を試みる必要がある。

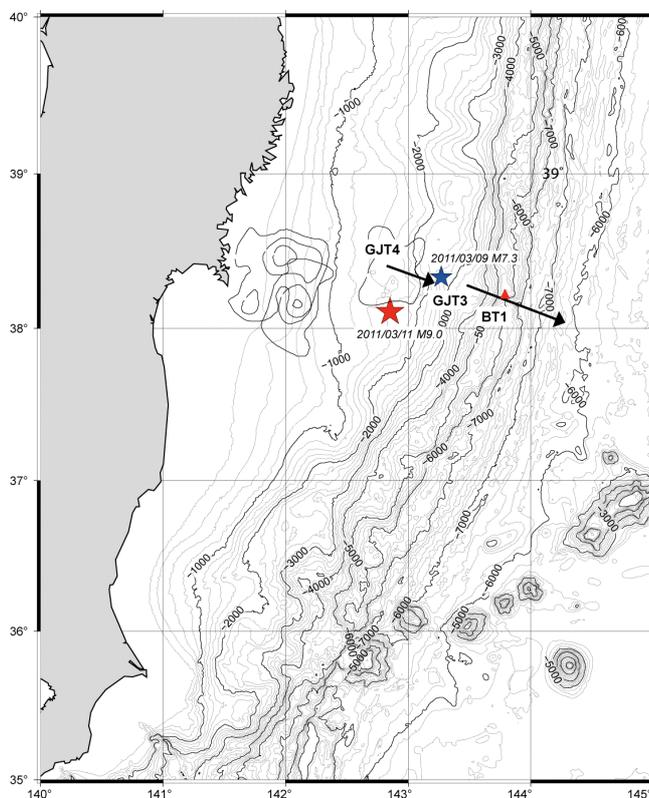


図 1-2(b)-1. GPS 音響結合方式海底地殻変動により観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う海底水平変動。GJT3 および GJT4 の 2 観測点で、31m および 15 m におよぶ水平変動が測定された。図中の矢印が各観測点における変位方向を示す。BT1 は海底圧力観測により 5 m の隆起が地震発生時に観測された地点。

2-1 小繰り返し地震から推定される固着の剥がれ

波形の相似性を利用して抽出した小繰り返し地震の積算すべりから、プレート境界での準静的すべりの時空間変化を推定した。

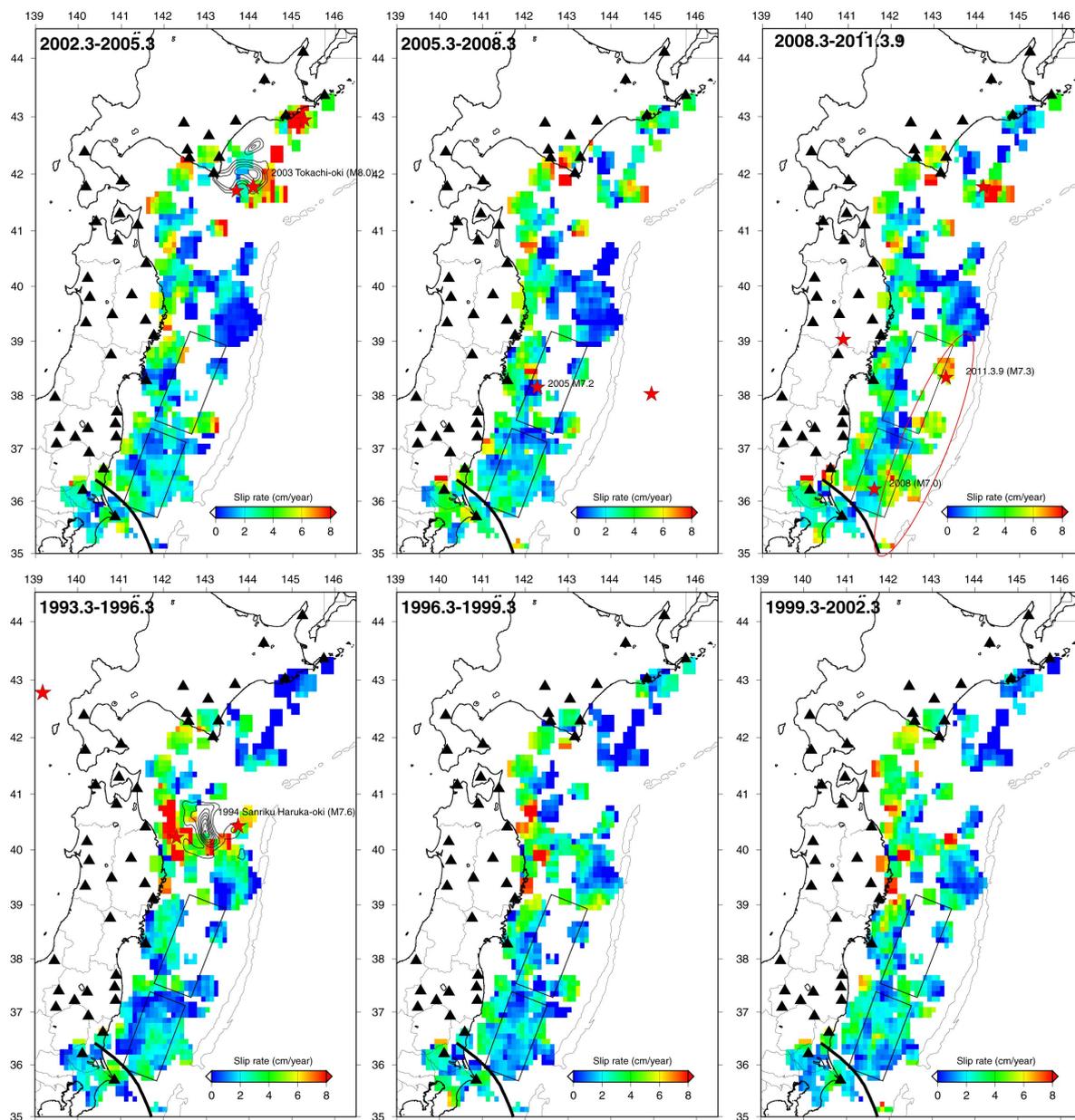


図 2-1-1. 太平洋プレート上面での 3 年ごと (各図の左上に解析期間表示) のすべりレート (カラー) 赤星は 70km 以浅の M7 以上の地震, 2 つの矩形は国土地理院による本震断層モデル (<http://www.gsi.go.jp/cais/topic110313-index.html>). 図中のコンターは Yamanaka and Kikuchi, EPS, 2003, JGR, 2004 による 2003 年十勝沖地震, 1994 年三陸はるか沖地震のすべり量分布. 黒太線は Uchida et al., EPSL, 2009 によるフィリピン海プレートの北東限で, これより南のすべりレートは解析の都合上, 暫定値となっている. 震源断層の updip (浅い側) で, 海溝に沿って 2008 年以降これまで見られなかった速いすべり速度が見られる (右上図の赤楕円付近). その南北の拡がりは, おおよそのすべり域と一致する. このような海溝沿いでの広域のすべり加速は過去には見られなかった.

2.2. 2011年3月9日三陸沖地震 (M7.3) -GPS, 地震活動, 水圧計から推定される前震の破壊過程-

2011年3月9日に発生した三陸沖地震(M7.3)の地震時断層モデルを、東北大学のGPS観測網及びGEONET観測点と東北大学の海底水圧計データを用いて推定した。GPS観測点では最大で2cm程度の東向き変位が観測された。震源からおよそ50km西北西にある海底水圧計では2.1hPaの水圧減少(2.1cmの観測点隆起)が観測された。これらを満足する断層モデルは1981年(M7)の東側および2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9)の北側に位置する。また、3月9日の地震から3月11日のM9の地震間に発生した余震活動の推移を詳細に見ると、M7.3の地震発生後10時間後では推定された震源断層周辺に余震が集中しているが、次の10時間ではそれが南側に拡大しているように見える。これは地震発生後20-30時間後でも同様である。またM9の震央より南側にM7.3の余震は存在しない。これらは地震発生後余効滑りが南側に進展し、すべりの先端部分に応力集中が起きたことにより余震が発生した可能性を示唆する。

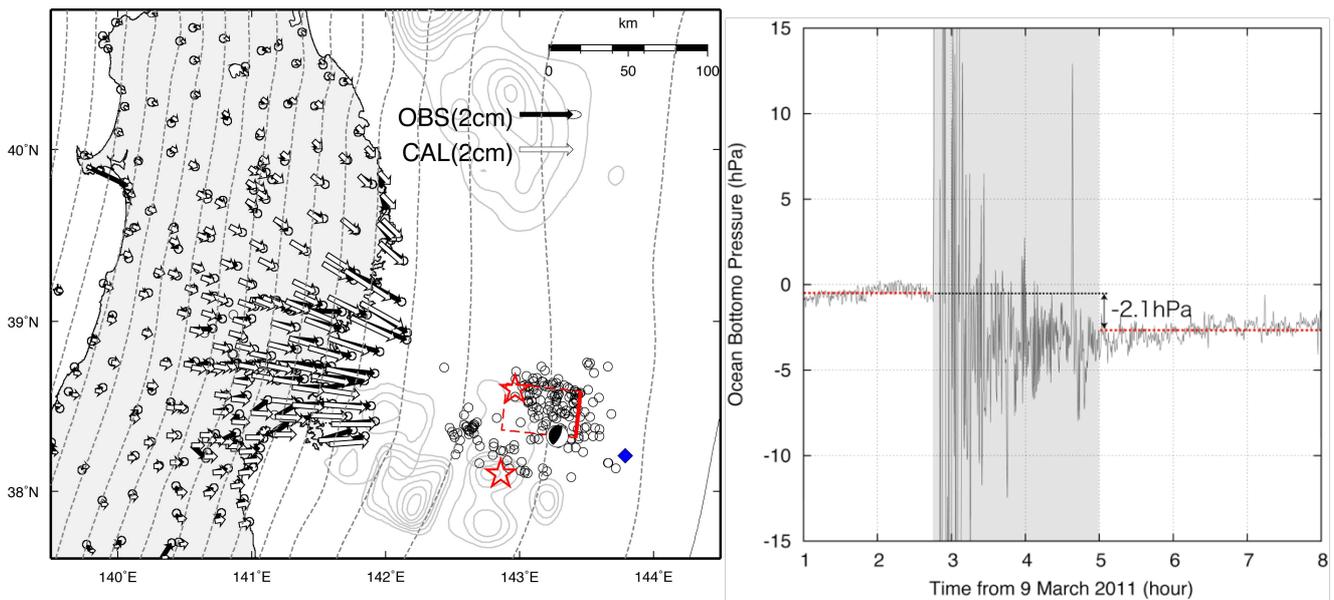


図 2-2-1. (左図) 観測された水平変動場および推定された断層モデルから期待される水平変動場。推定された断層面を赤矩形で示す。青色菱形は海底水圧計の位置を示す。灰色丸印は2011年3月9日以降3月11日までの地震の震央を示す。赤星印はそれぞれ(北側)1980年(M7.0)の震央、(南側)2011年(M9)の震央を示す。メカニズム解は防災科研F-netによるもの。(右図) 海底水圧計における地震時の時系列。地震前と地震後に明瞭なオフセットが見られる。

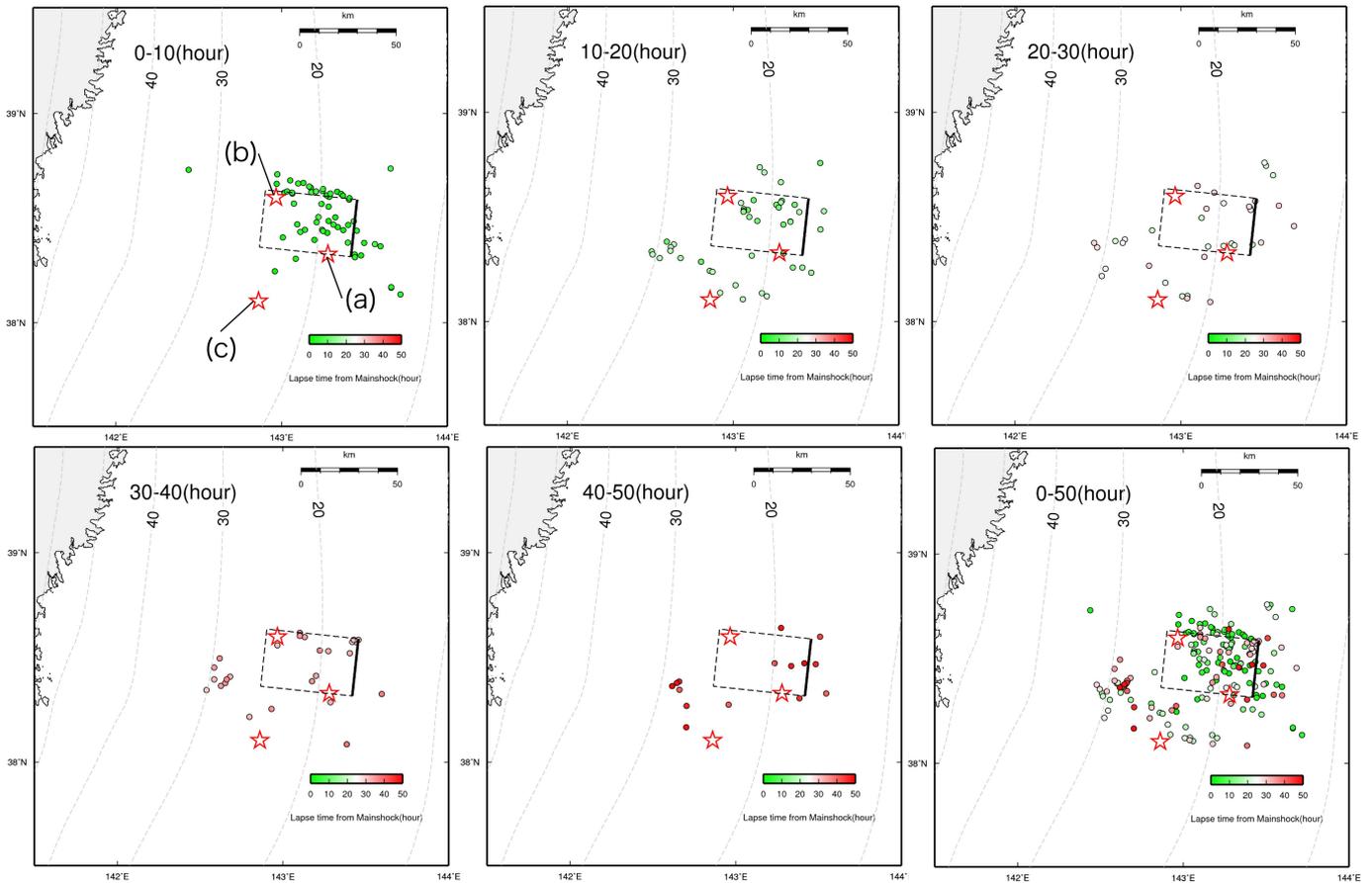


図. 2-2-2. 2011年3月9日のM7.3地震後からの余震の時空間発展. 各パネルはM7.3地震後からの10時間毎の余震分布を示す. 右下図は全期間の余震分布を示す. 各図中の星印は(a): 2011年3月9日M7.3地震 (b): 1981年M7.0地震, (c): 2011年3月11日(M9.0)地震の震央をそれぞれ示す. 各余震の色はM7.3地震後からの経過時間を示す. 0-10時間では震源断層周辺に余震が集中しているのに対し, それ以降では特に南側に余震が広がっているように見える.

2-3. 本震直前の金華山観測点等でのひずみ変化

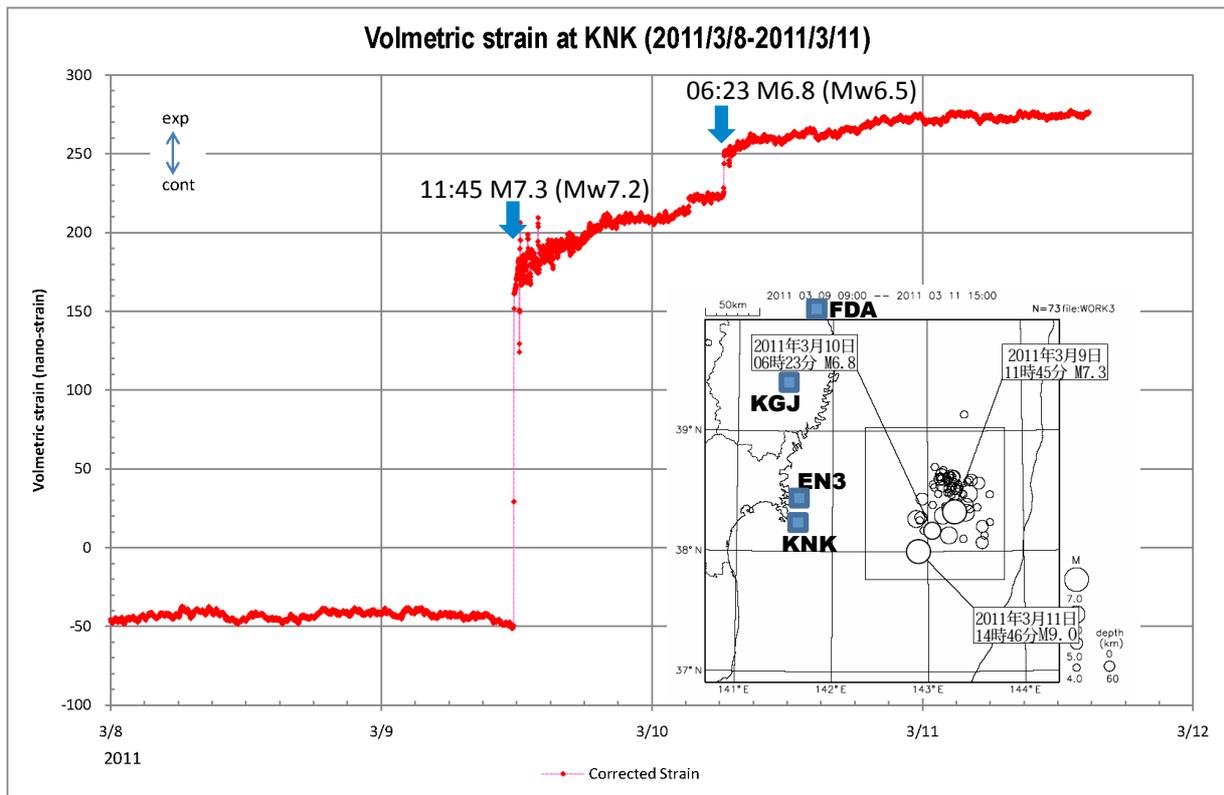


図2-3-1. 本震直前の金華山(KNK)観測点での体積ひずみ変化. 2007年3月~2008年3月の期間に求めた係数から潮汐と気圧をBAYTAP-Gで補正. 10 nstrain のひずみが本震震源でのMw6.3相当. 挿入図は気象庁(2011)に加筆.

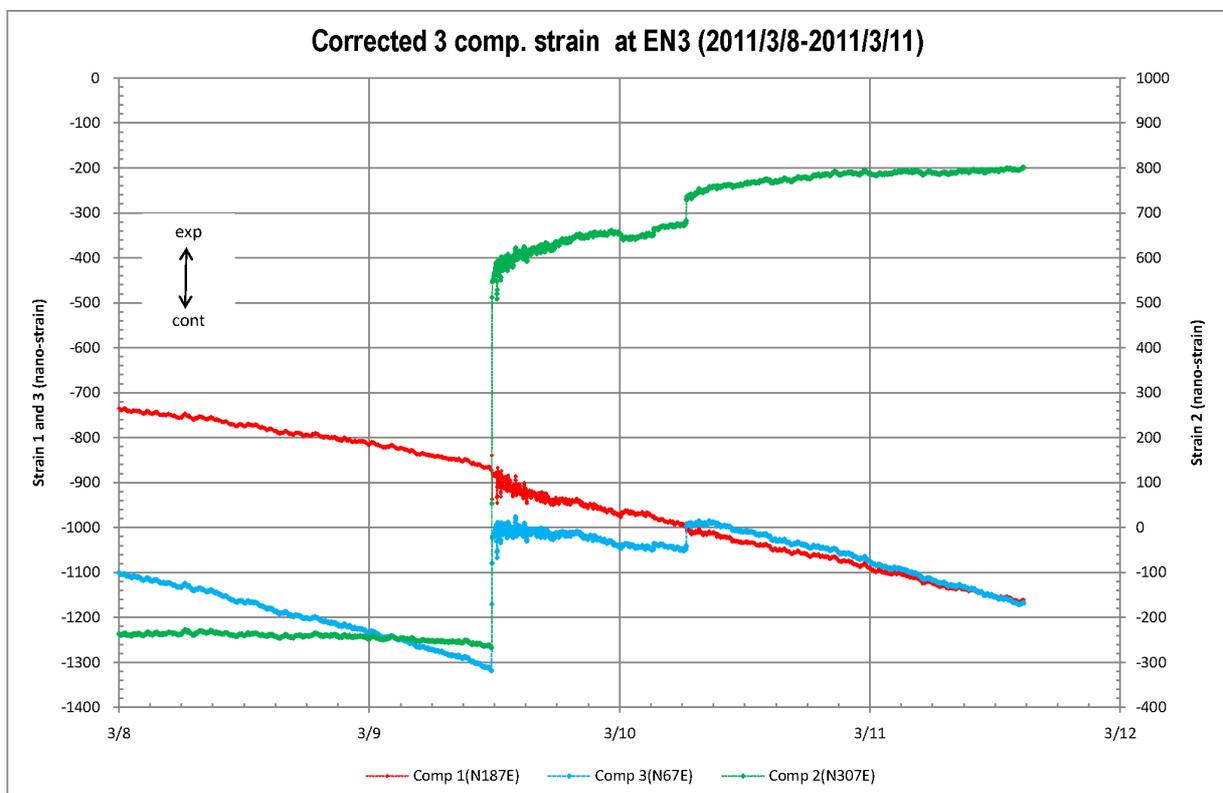


図2-3-2. 本震直前の江ノ島(EN3)観測点での3成分ひずみ変化.

2-3. 本震直前の金華山観測点等でのひずみ変化(続き)

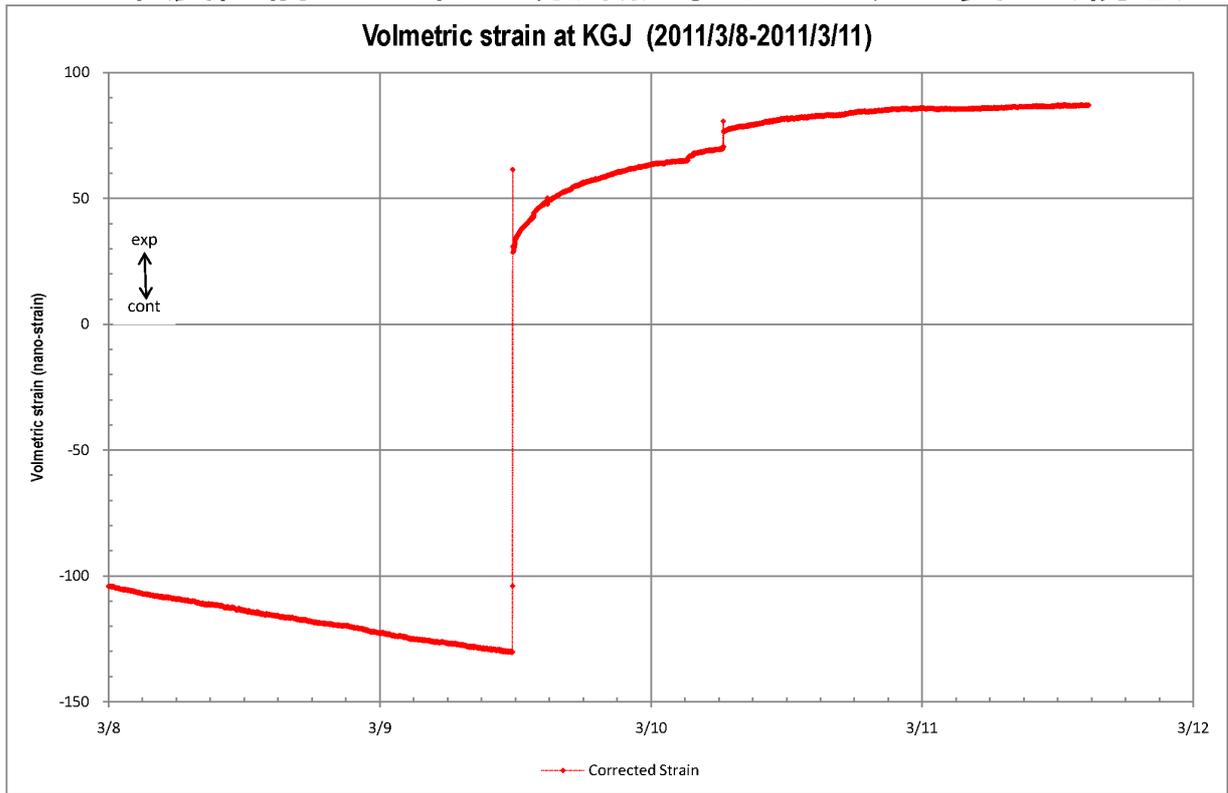


図2-3-3. 本震直前の遠野(KGJ)観測点での体積ひずみ変化.

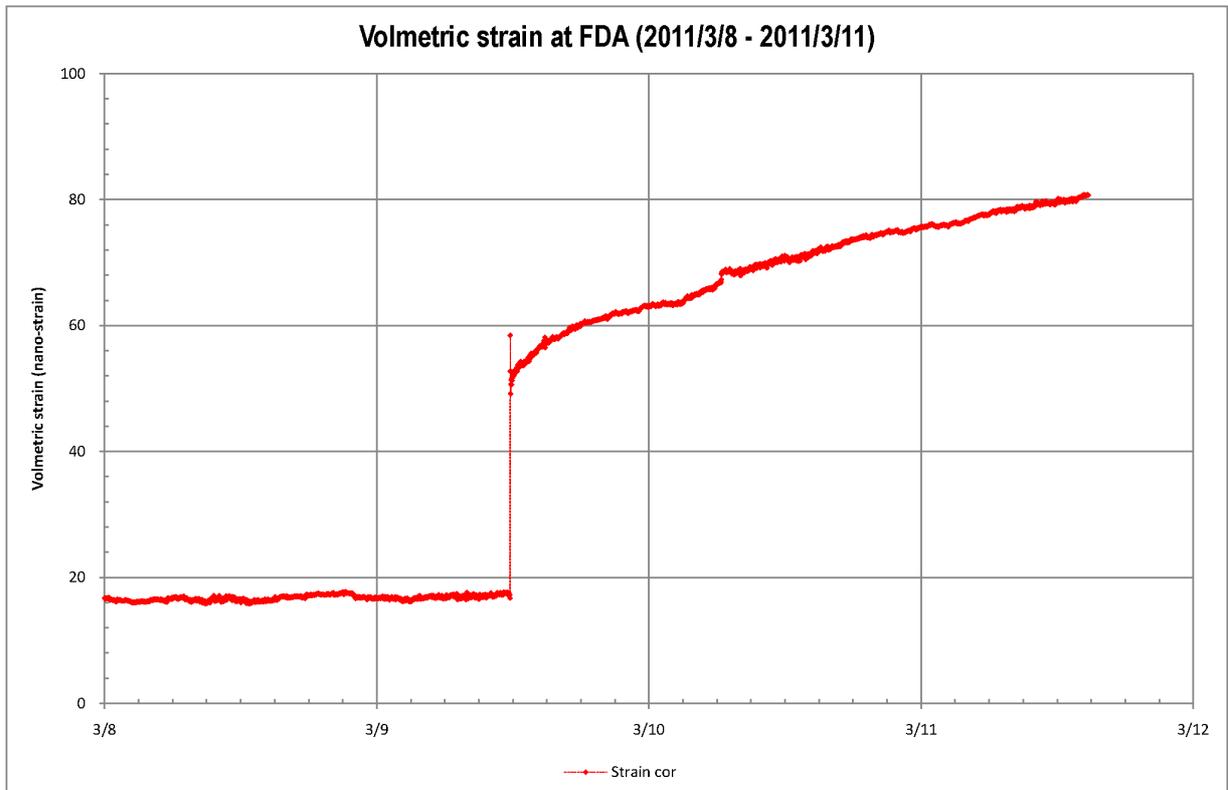


図2-3-4. 本震直前の普代(FDA)観測点での体積ひずみ変化.

3-1 小繰り返し地震から推定されるカップリング率の分布

小繰り返し地震の積算すべりから求めた、プレート境界での準静的すべり領域のすべりレートをプレート収束速度で割ることで、プレート間カップリング率の空間分布を求めた。

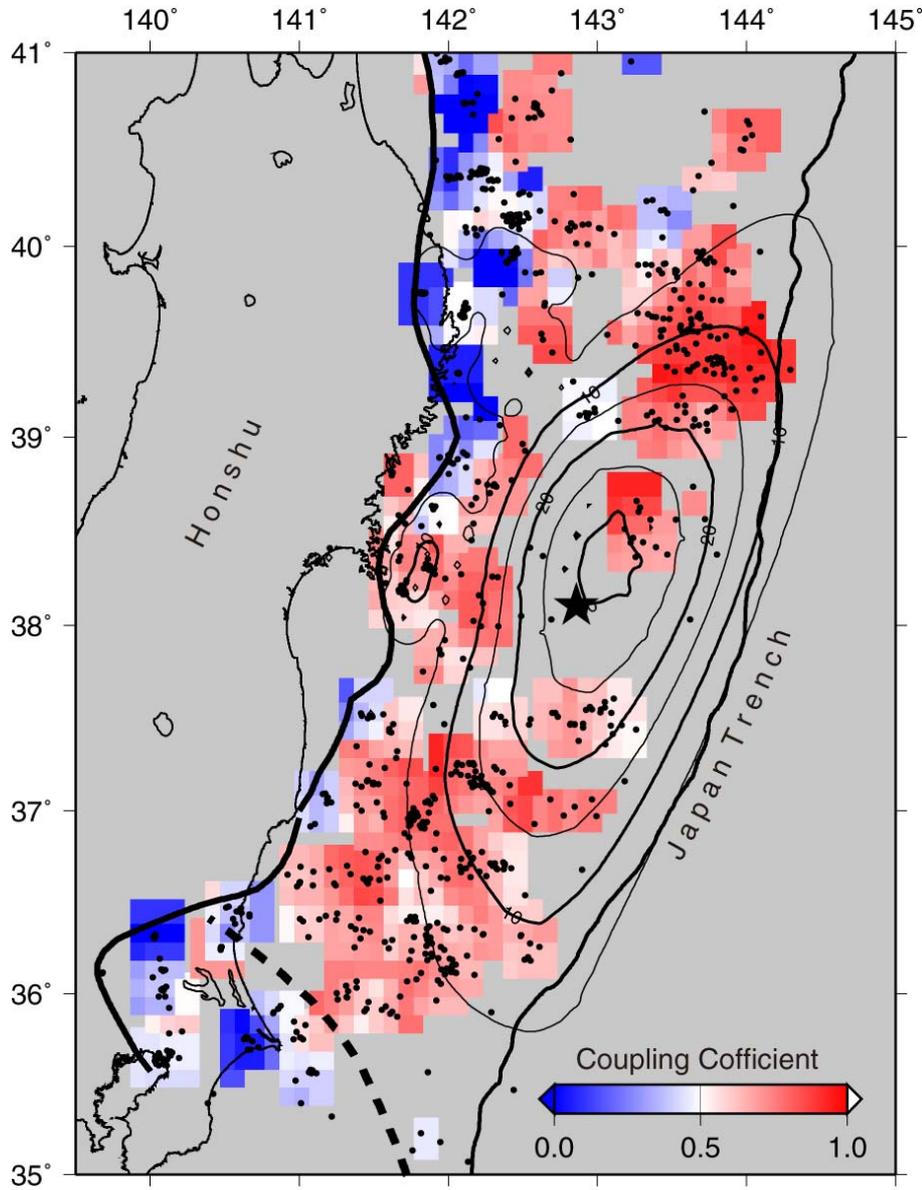


図 3-1-1. 1993-2007 年の小繰り返し地震（黒点）のすべりレートから計算された太平洋プレート上面のカップリング率の分布. コンターは GPS 観測から求められた本震の地震時すべり量の分布 (Iinuma et al., 2011). コンター間隔は 5m で福島県南部以南のデータを解析に用いていないため、茨城県沖については誤差が大きい. 黒星は気象庁による本震の震央, 黒太線は Igarashi et al., 2001, Uchida et al. 2009 によるプレート境界型地震の西縁, 破線はフィリピン海プレートの北東限 (Uchida et al, 2009) を示す. 地震時すべりは小繰り返し地震の密度が比較的小さい宮城県沖に最大値を持つ. フィリピン海プレートが太平洋プレート上に存在する領域 (破線より南), プレート境界型地震西縁付近 (実線沿い) および岩手県沖 (北緯 39-40° N) では比較的プレート間カップリング率が小さく, その領域に地震時すべりはあまり及んでいない. また海溝沿いのカップリング率も大きい.

4-1. 本震による最大主応力軸の回転 -本震により応力はどの程度解放されたか?-

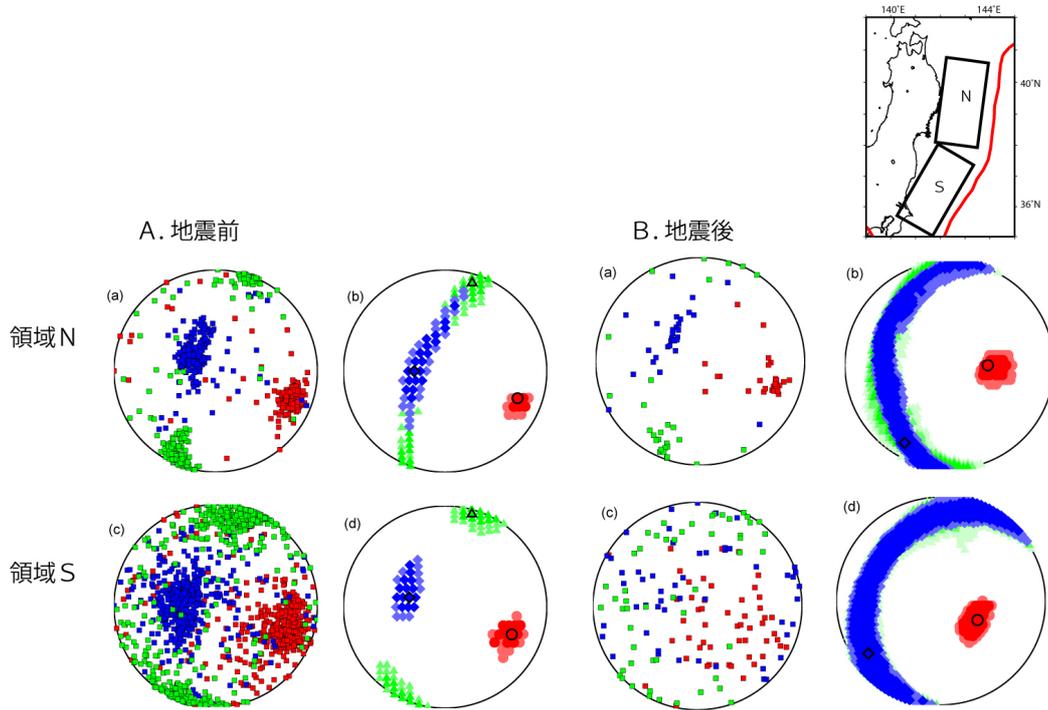


図 4-1-1. 2011 年 Mw9.0 東北沖地震前後の応力場。A 1997 年～2011 年 3 月 10 日, B 2011 年 3 月 12 日～4 月 6 日の期間に, 挿入地図に示す領域 N (北側) および領域 S (南側) 内に発生した地震のメカニズム解を用いて, 応力テンソルインバージョンにより求めた σ_1 軸 (赤丸), σ_2 軸 (緑丸), σ_3 軸 (青丸) を, 各図の右側に下半球投影で示す。左側の図は, メカニズム解の P (赤丸), T (緑丸), B (青丸) 軸を示す。メカニズム解は, 防災科学技術研究所の F-net による CMT 解から, プレート境界を中心にして深さ方向に幅 25km の範囲に震源が決まったものを用いた。

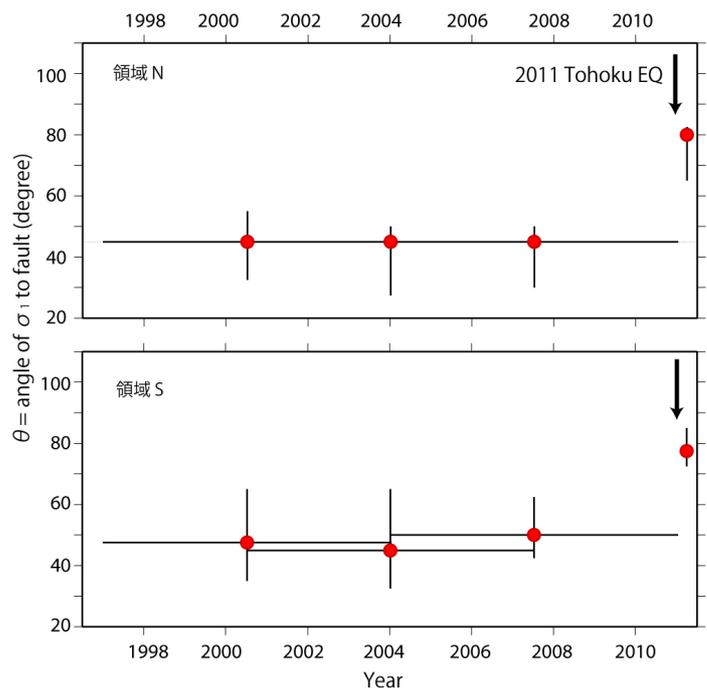
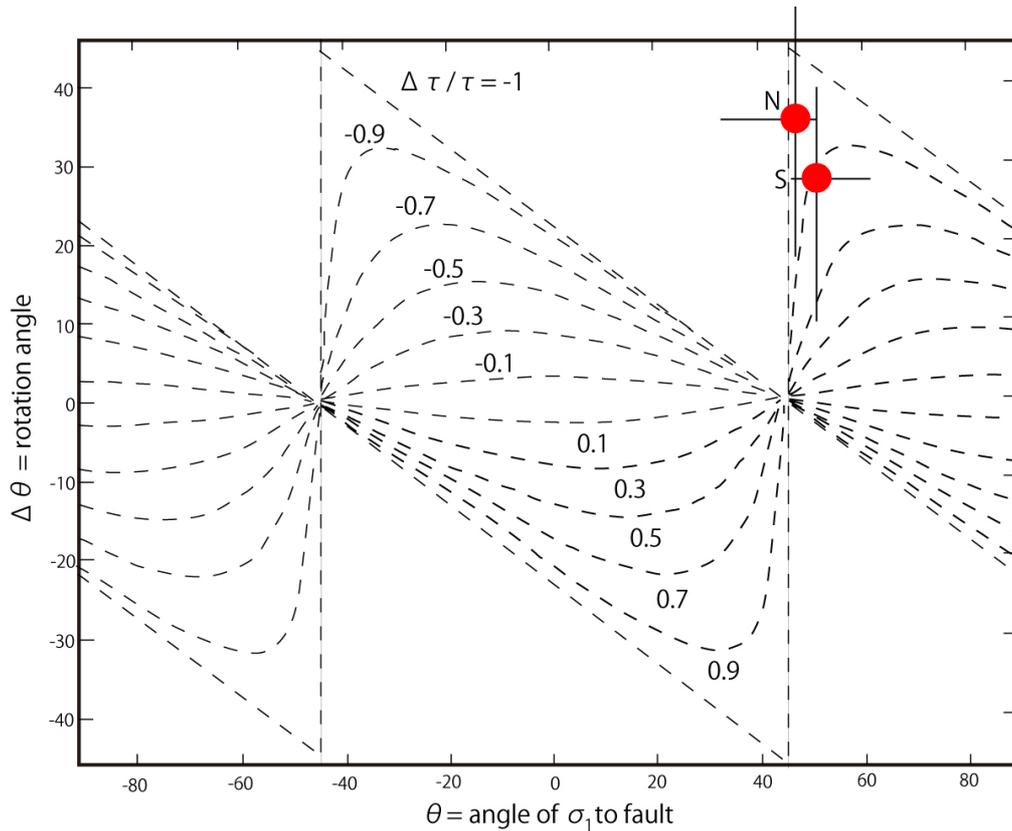


図 4-1-2 σ_1 軸が断層面となす角の時間変化。1997 年～2004 年, 2000 年 5 月～2007 年 5 月, 2004 年～2011 年 3 月 10 日, 2011 年 3 月 12 日～4 月 6 日の期間の領域 N (上図) および領域 S (下図) についての結果を示す。



◎ Stress rotation due to slip on fault

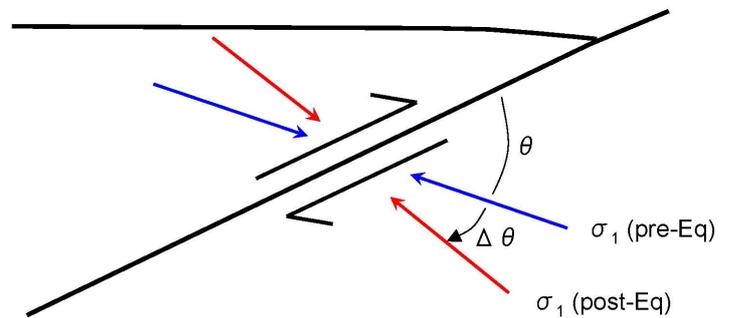


図 4-1-3. 断層滑りに伴う σ_1 軸の回転 (Hardebeck and Hauksson, 2001)。
 σ_1 軸と断層面となす角 θ とその回転角 $\Delta\theta$ (下図模式図参照) との関係をもとに、 $\Delta\tau/\tau$ の値をパラメータとして示す。ここで τ は断層面に働くせん断応力、 $\Delta\tau$ はストレスドロップ。観測された領域 N および領域 S の回転角を赤丸で示す。

● 結果

- $\Delta\tau/\tau \sim 0.9-0.95$
 地震前の応力は、東北地方太平洋沖地震の発生によってほとんど解放された
 or 応力降下はほぼ完全だった
- 地震後、太平洋下の浅い地震 (余震) の中に、正断層型の余震が多数発生しているのは、それが原因である
- GPS データに基づく slip model から推定された average stress drop $\Delta\tau \sim 20\text{MPa}$ (Iinuma et al., 2011)
 従って、地震前のせん断応力 $\tau \sim 22\text{MPa}$, 強度 $\sim 22\text{MPa}$
 → weak fault
- overpressured fluids によると考えて、間隙流体圧比 $\lambda = P_f / \sigma_n$ (間隙流体圧と法線応力の比) を推定する

$$\tau = c + \mu(1-\lambda)\sigma_n$$

$$c = 0, \mu = 0.6$$
 とし、 σ_n を深さ 25km での被り圧で近似して
 間隙流体圧比 $\lambda = \sim 0.94$

東北大学大学院理学研究科・2011年東北地方太平洋沖地震合同観測グループ
4-2. 2011年4月7日宮城沖地震(M7.1)の断層モデル

2011年4月7日に発生した宮城県沖地震(M7.1)の地震時断層モデルを、東北大学のGPS観測網及びGEONET観測点を用いて推定した。水平変位は沿岸部で北向き変位から南西向き変位、内陸部でわずかな東向き変位が確認された。鉛直変位では沿岸部で隆起傾向が確認され、これら変位場の特徴は、この地震がプレート境界で発生したものではなく、プレート内で発生した地震であることを強く示唆する。これらのGPSデータより推定された断層モデルは、余震分布(東に傾き下がる分布)と良い一致を示す。また2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9)の地震時すべり分布(第190回予知連資料(東北大資料))と比較すると、宮城沖で10mを超えてすべった領域の直下に位置する。

Longitude (degree)	Latitude (degree)	Depth (km)	Length (km)	Width (km)	Strike (degree)	Dip (degree)	Rake (degree)	Slip (m)
141.781	38.239	54.5	31.6	17.6	24.6	37.3	97.6	2.51

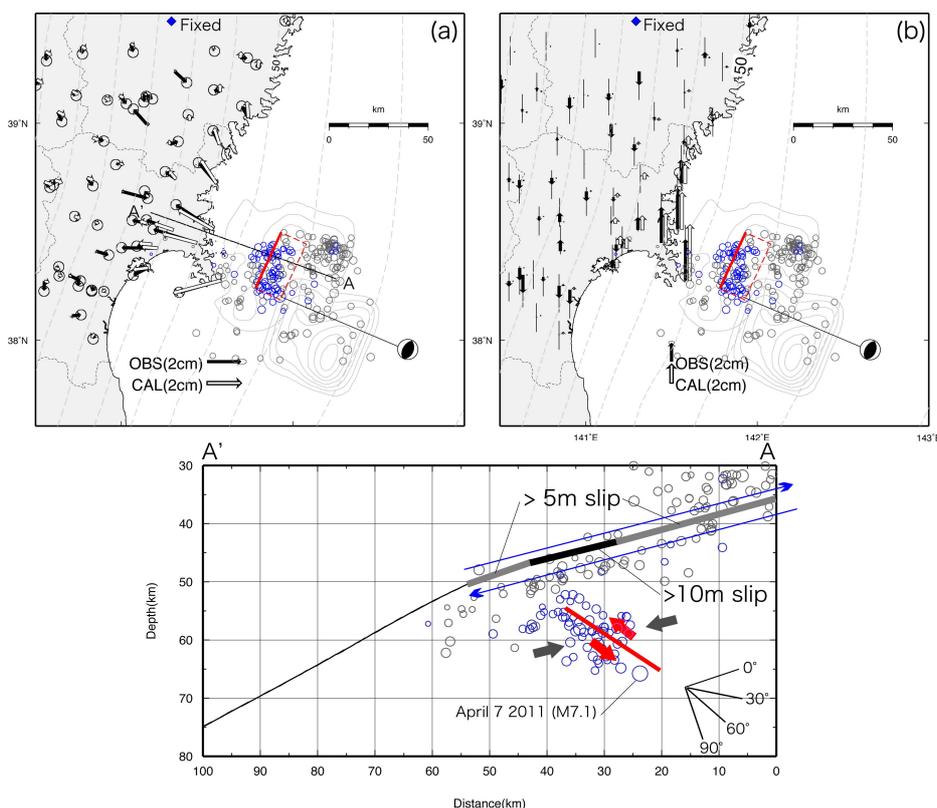


図. 4-2-1. (上表) 推定された断層モデルの諸パラメータ, (中図) 観測された水平変動場 (左図) および推定された断層モデルから期待される水平変動場 (右図) 推定された断層面を赤矩形で示す。灰色丸印は2011年3月11日以降4月10日までの地震の震央分布。青丸印は4月11日以降の地震の震央を示す。(下図) 震源域を横切る深さ方向のクロスセクション。中左図中のA-A'断面を示す。赤太線が推定された断層面。沈み込むプレート上の太黒線, 太灰色線は東北地方太平洋沖地震(M9)の地震時すべり分布(第190回予知連資料(東北大資料))においてそれぞれ10m, 5m以上すべった領域を示す。

4-3 釜石沖の M5 の活動について

岩手県釜石沖の地震クラスターでは、1957年以降、およそ5年間隔でM5前後の地震の発生が知られていたが、今回の地震後、その地震クラスターでM4.5以上の地震が3回起きていたことが分かった。

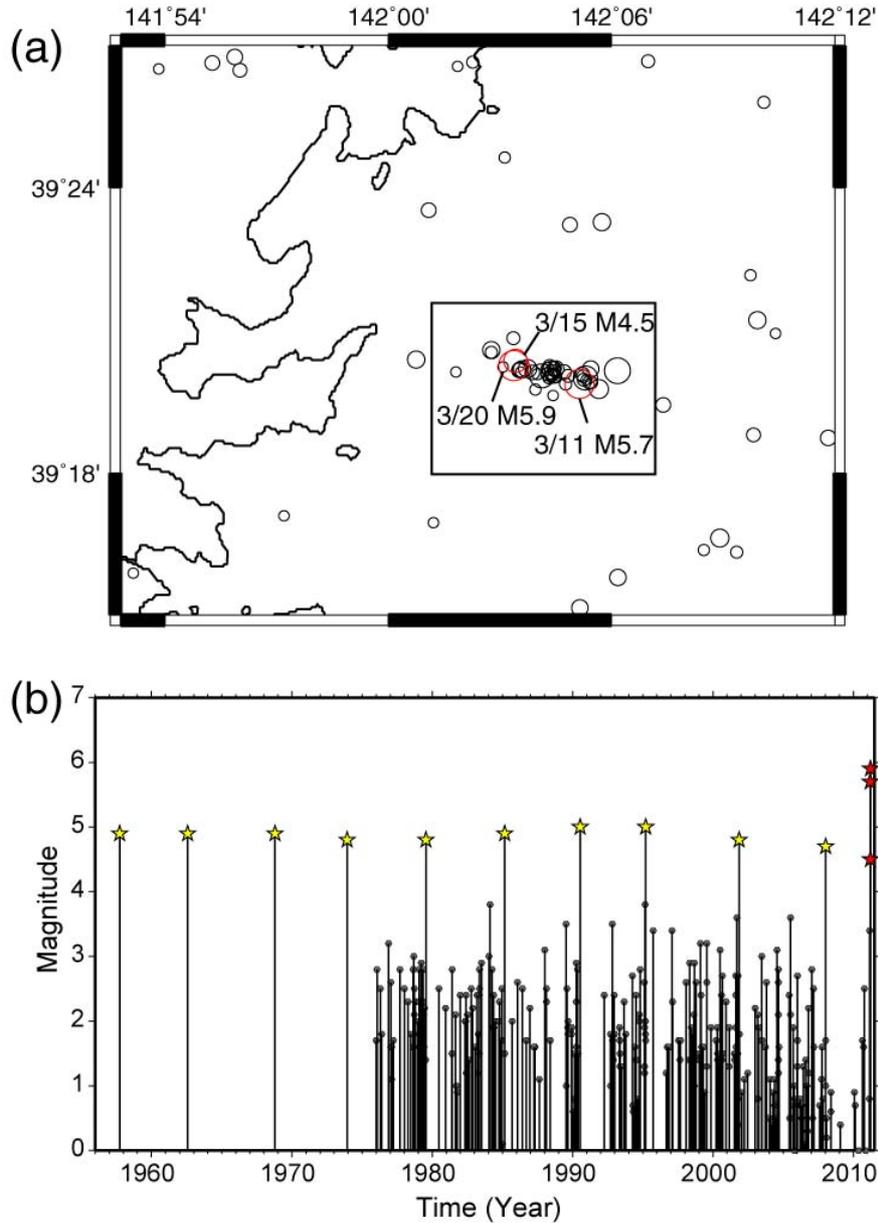


図 4-3-1. (a)気象庁の読み取り値に基づき、ダブル・ディファレンス法で決定した1994年以降の震源分布. 赤色は2011年東北地方太平洋沖地震後の地震を示す。(b)この地震クラスターでの1957年以降の地震のM-T図(ただし1975年以前はM5前後の地震の系列のみ). 今回発生した地震は、本震の約1時間後、4日後、及び9日後に発生し、うち2つはこれまでよりもマグニチュードが1程度大きい. これまで、周囲の大地震により、発生間隔が変化することは知られていた(Uchida et al., EPSL, 2005)が、その揺らぎは、最大でも1年程度であった. この3つの地震のすべり域が重なっていると考え、そのすべり量の積算値を小繰り返し地震のすべり量の推定に用いている Nadeau and Johnson (1998)のスケーリングにより求めると180cmとなる.

4-4. 3/11からの東日本(特に東北地方)の内陸の地震活動について (1)

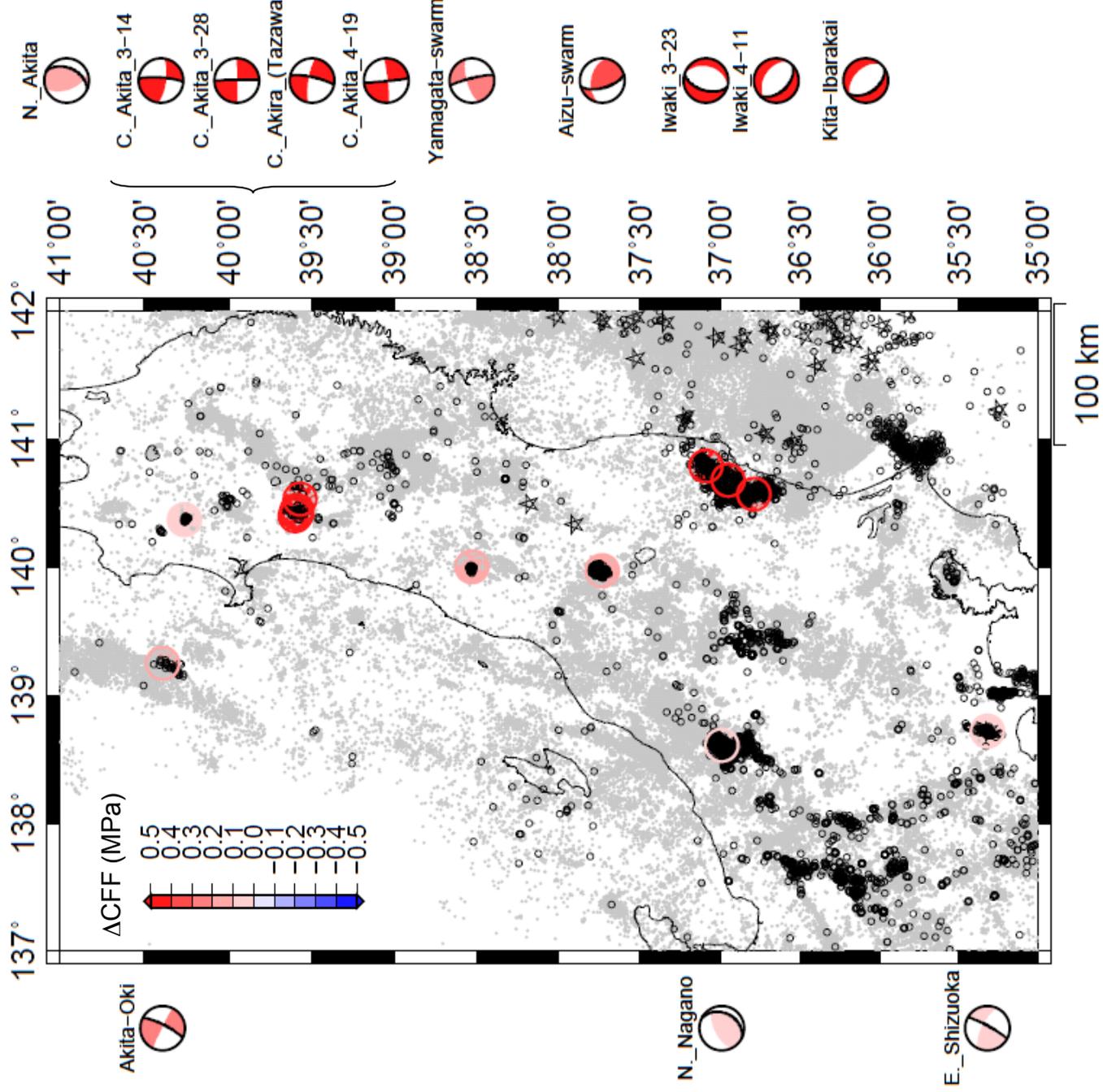


図1. 断層面とクーロン応力変化。メカニズム解と震源分布などから推定される断層面(太線で示す節面)に対するクーロン応力変化の値を○の色で示す。Coulomb3.2 (Lin and Stein, 2004; Toda et al., 2005)を使用した。いずれの断層に対しても、クーロン応力変化については正の値が推定されている。

ここでは東北地方太平洋沖地震のすべり量分布としては、linuma et al. (2011)を使用した。摩擦係数は0.65としている。

あわせて、気象庁一元化震源による3/11-4/11の深さ20kmより浅い地震の震央分布(黒丸)、灰色の○は3/11以前の浅い地震の震央分布を示す。☆はM5以上の地震を示す。3/11以降の活動は3/11以前に活動の高い領域およびその周辺におよそ見られる。

4-4. 3/11からの東日本(特に東北地方)の内陸の地震活動について(2)

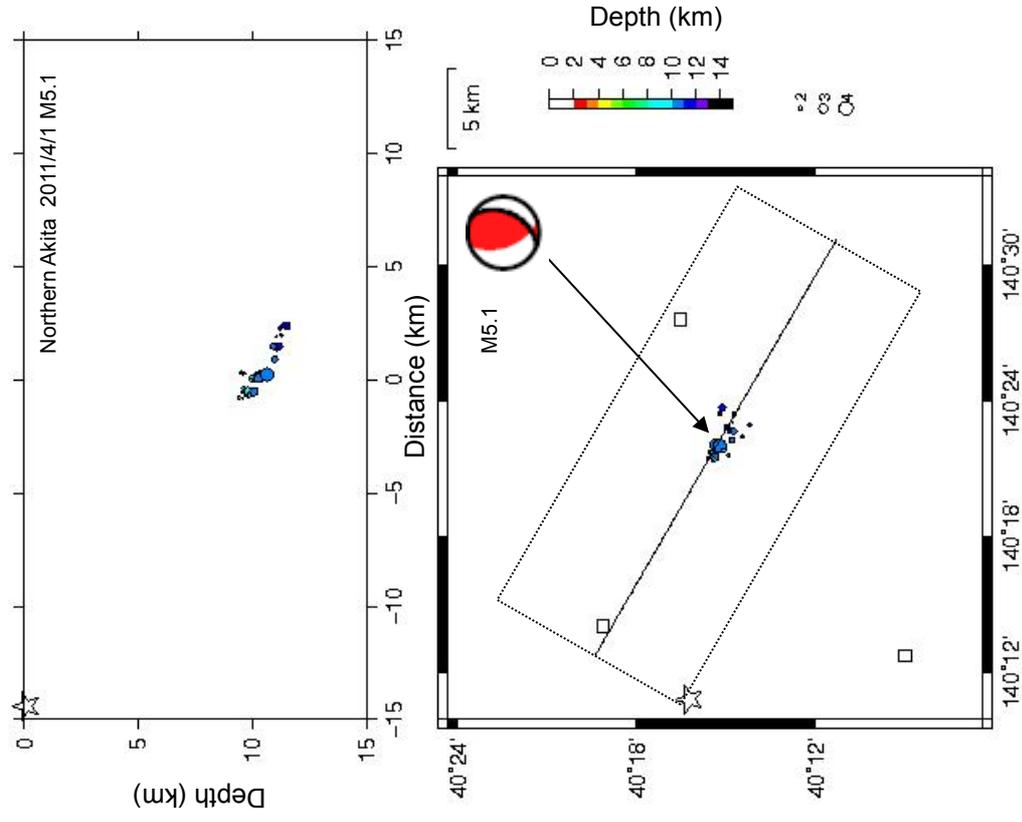


図2. 2011/4/1秋田県北部の地震について得られた, DD法による再決定震源分布(-4/6):北西-南東方向の断面図(上)と震央分布図(下)を示す. 右上には防災科学技術研究所のAQUA-CMT解を示す. これらより東ないし南東方向に傾斜した余震の並びが断層面であると考えられる. ☆は1955年ツ井地震(断面図では震央を示している.)

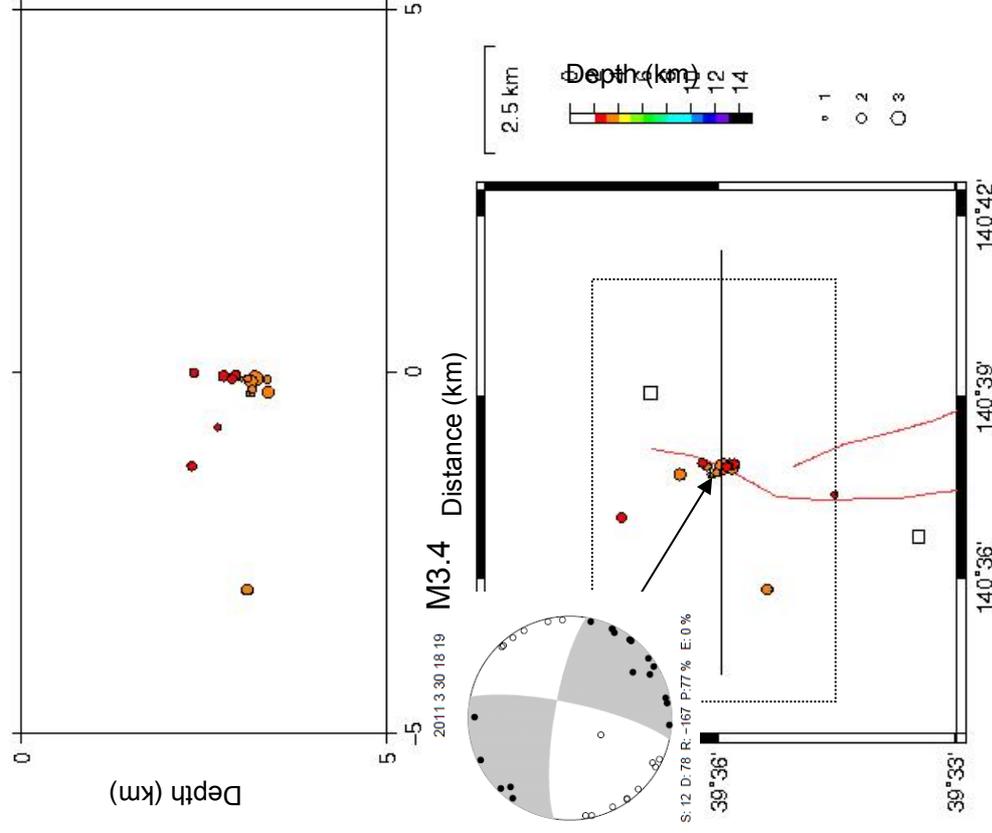


図3. 秋田県中部(田沢湖周辺)の地震について得られた, DD法による再決定震源分布:南北方向(左)と東西方向(右)の断面図と震央分布図を示す. 地震の押し引きによるメカニズム解を示す. 3/30の地震の余震は南北方向に並んでいる様子が見られ, 南北方向の節面が断層面であると考えられる.

5-1. 東北大学 GPS 観測点および GEONET における 東北地方太平洋沖地震後の余効変動

東北大学の GPS 観測点および国土地理院 GEONET 観測点のデータを用いて 4 月 18 日分までの余効変動時系列を抽出した。解析には Bernese GPS Software Ver.5.0 の基線解析を用いた。各時系列は IGS 点に準拠後、水平変動に関しては GEONET 1093 (鹿児島県 大根占) を固定点、上下変動に関しては楕円体高の変化をそれぞれ示している。得られた時系列は水平成分で顕著な余効変動を示す。対照的に上下変動では水平成分と比較して余効変動は小さいが、岩手県沿岸部では沈降傾向、宮城県沿岸部でわずかに隆起傾向が確認できる。また牡鹿半島の観測点では 4/7 に発生した宮城県沖のスラブ内地震 (M7.1) による 2-3cm 程度の隆起が確認できる。

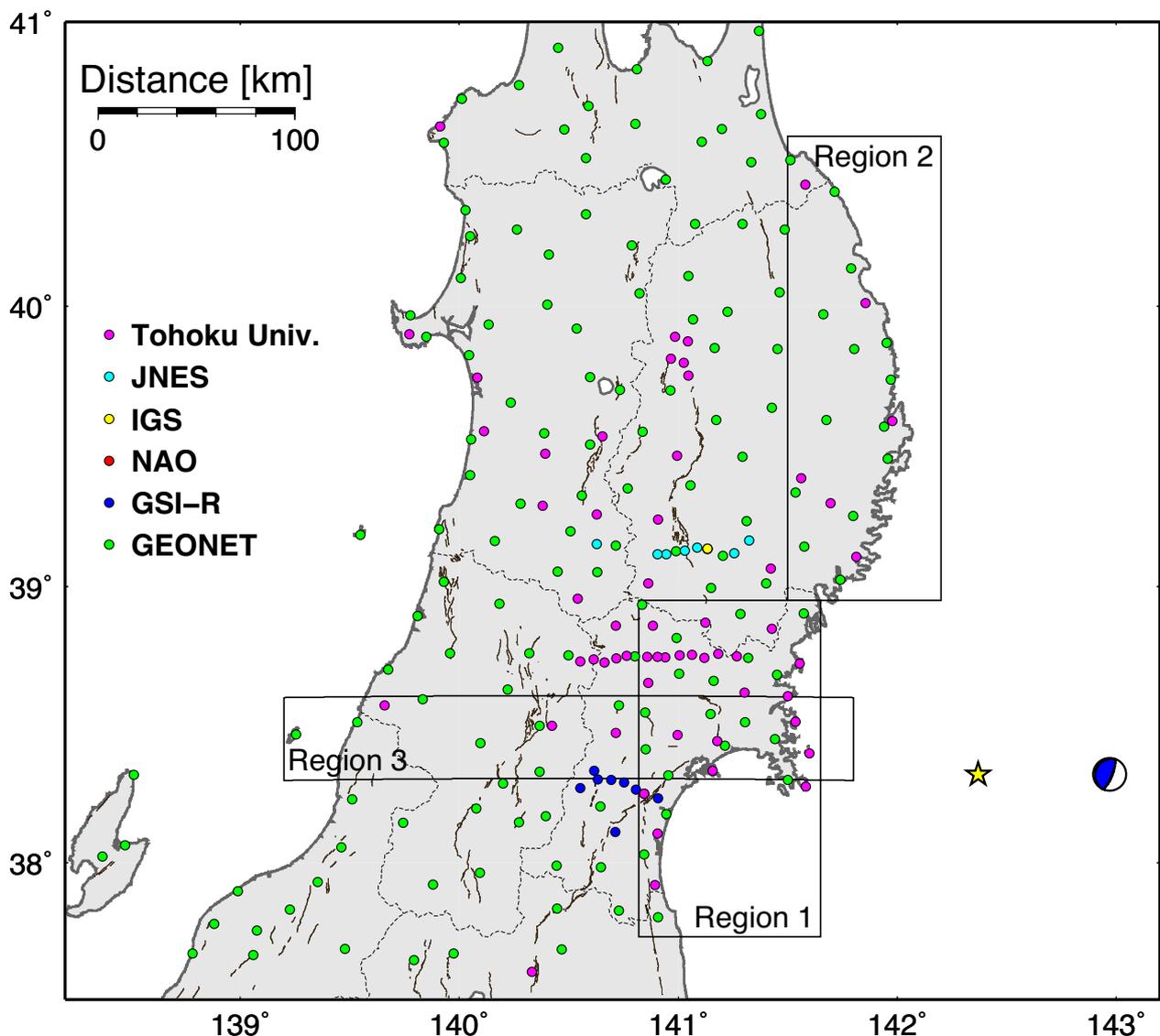
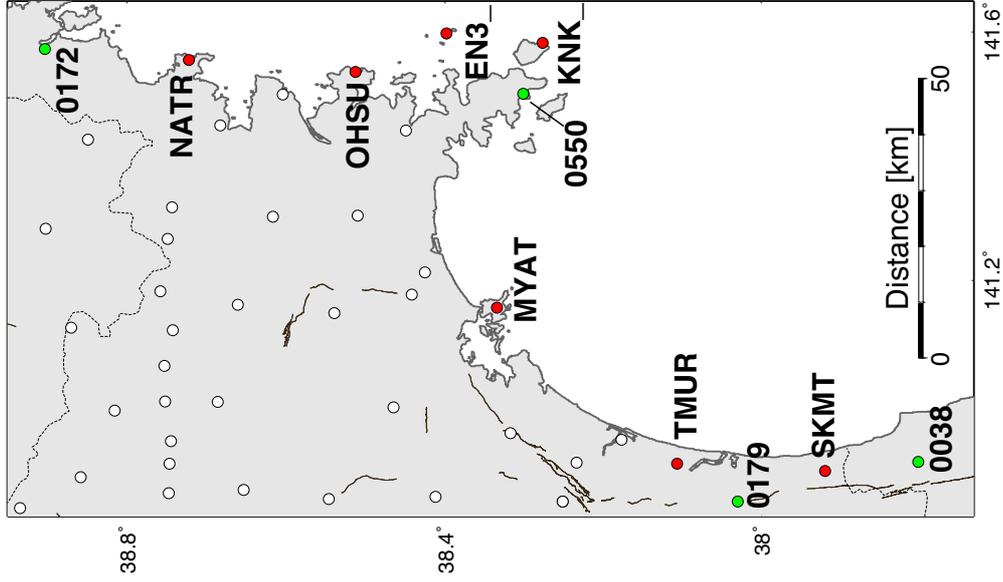
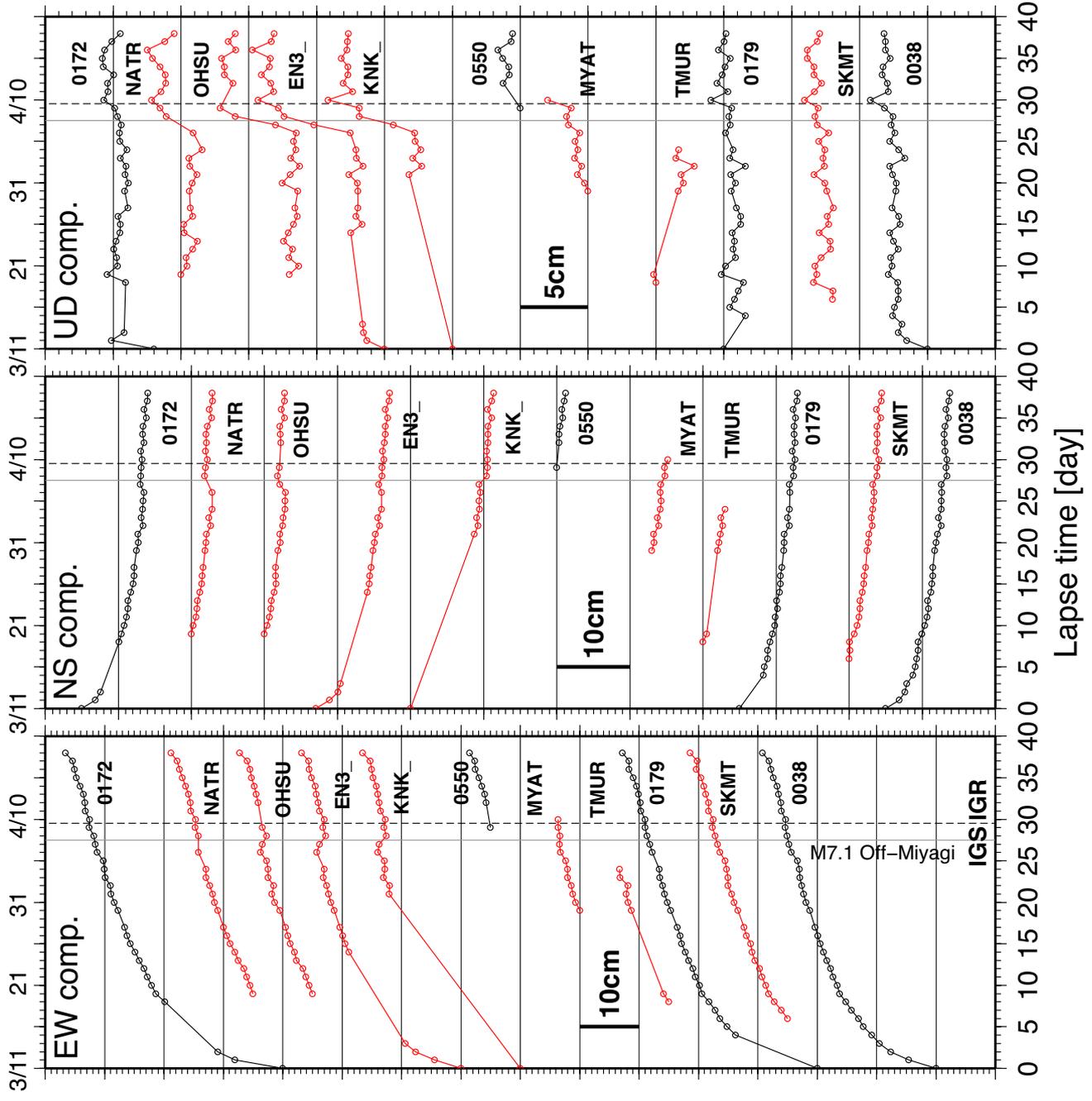


図 5-1-1. 観測点配置図。桃色丸印が東北大学の観測点、水色丸印が原子力安全基盤機構(JNES)の観測点、緑色が GEONET の観測点をそれぞれ示す。青色丸印は国土地理院と東北大学の共同研究観測点。図中各矩形領域は次図以降で時系列を示す領域を表す。

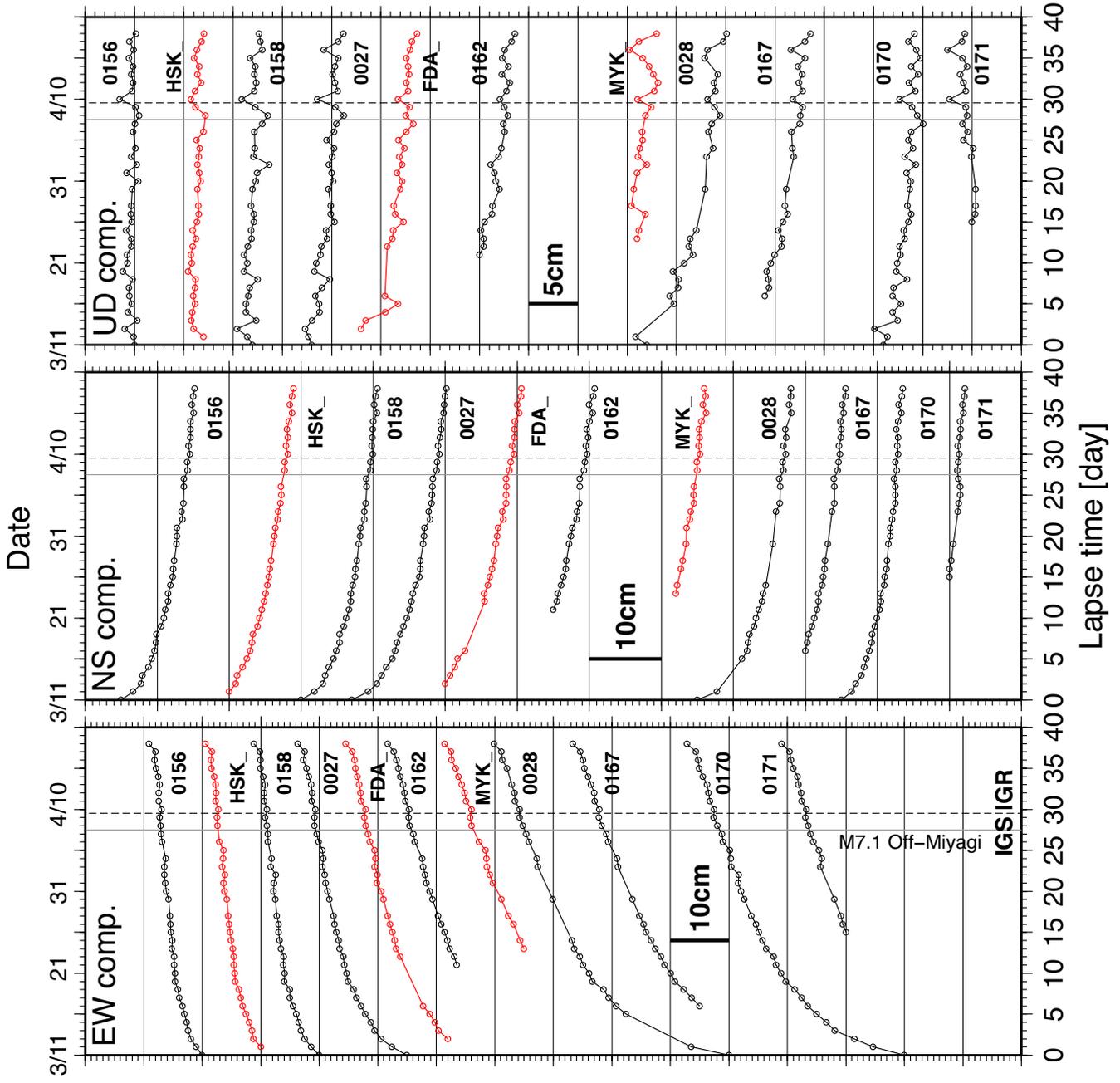
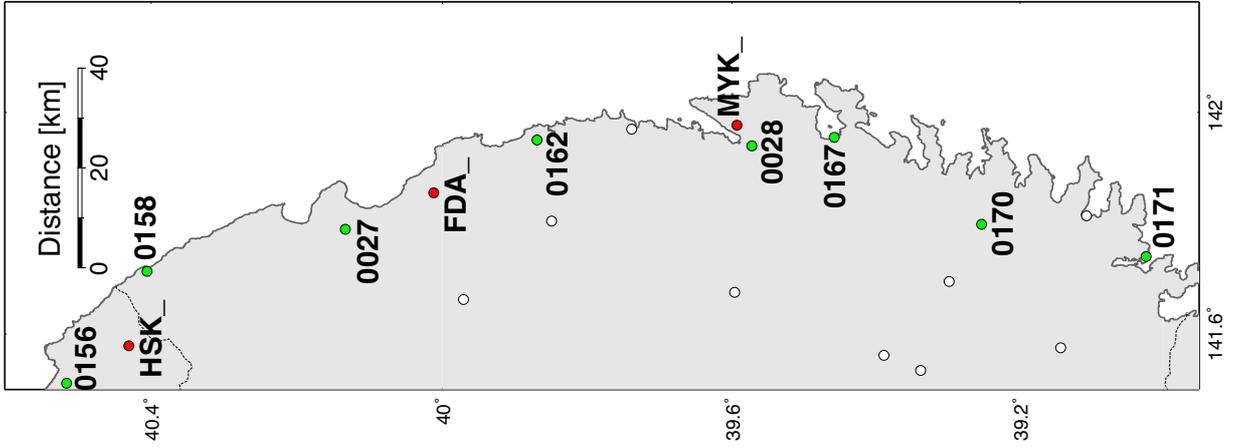
Region 1.



Date



Region 2.



Region 3.

