

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

宮城県沖プレート境界の多項目・高精度モニタリングによる大地震発生過程の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

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

イ. 地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

(4) その他関連する建議の項目：

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

ア. アスペリティの実体

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

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

下記の 4 小課題を実施し、相互に連携させることにより、プレート境界のモニタリング手法を高度化させる。

1. 海底微小地震観測により、プレート間すべり・応力場の時空間変化の把握のための技術開発を行う、また海底地殻変動観測により、プレート間すべり分布の時空間分布の推定を行う。

2. GPS 連続観測データの日座標値解に含まれる季節変動成分や気圧応答、水蒸気分布の非一様性による電波伝搬遅延誤差といった誤差要因の除去法の高度化をすすめ、データに含まれるより小さなシグナルを検出可能にする。これにより、これまでノイズに埋もれていたプレート境界上の非地震性すべりを検出できるようにする。

3. 相似地震データ解析によって、プレート間準静的すべり状況を把握し、GPS データとの比較を行う。また、個々の相似地震の詳細な震源分布、活動履歴、プレート境界付近の小地震の活動、小地震の応力降下量等とプレート間すべりの状況を比較し、プレート間の固着状況とこれらの観測量との関係を調べる。

4. 上述の科学研究費補助金基盤で構築した深層地下水変動観測 + 遠隔自動受信システムを本研究計画の 5 年間継続稼働させ、データを蓄積しつつ来るべき宮城県沖大地震に備える。この間、各観測サイトの水理学的個性を理解し、前駆的シグナルの判別法を整備する。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度は、以下の計画に基づいて研究を遂行する。

1. 海底諸観測：宮城県沖海域において、自己浮上式海底地震計を用いた繰り返し観測を実施し、特に小地震に注目してその発震機構解を推定し、その空間分布パターンからアスペリティ周辺における

応力場の解明を進める。また、GPS/音響ならびに海底圧力観測による地殻変動観測を実施し、陸上測地データとの総合解析により、非地震性すべりの検知を試みる。

2. GPS 連続観測網：GPS 連続観測データ解析のより一層の高度化をはかる。具体的には、基線解析の戦略や採用する天頂大気遅延量のマッピング関数の比較等を行って、ノイズの軽減に努め、微小な非地震性すべりの検出をめざす。また、測地インバージョン法の改良を行い、解析結果の安定化と信頼性の向上をはかる。

3. 相似地震データ解析：宮城県沖を含む領域で、相似地震によるプレート間準静的すべり状況の把握を行い、GPS データとの比較を行うとともに、宮城県沖のプレート間の固着状況や過去の大地震の活動域との関係を調べる。

4. 地下水位観測：「深層地下水変動観測システム」により、地下水の温度、水位、ラドン濃度の連続観測を継続し、地震活動との関係を解析しつつ、宮城県沖地震に備える。

平成 22 年度以降は、海底諸観測については微小地震活動の発震機構解を用いて応力場の時間変化と、相似地震・GPS 観測から明らかとなるプレート間すべりの時空間分布との対応関係を明らかにし、固着・すべり状態のモニタリングの高度化を図る。GPS 連続観測・地下水位観測については、蓄積されるデータに基づいて同様の解析をすすめて、必要に応じて新たな解析手法を導入し、解析結果の精度向上に努める。相似地震解析については、プレート間準静的すべり状況の把握を続けるとともに、プレート境界付近の小地震の応力降下量の推定を行う。さらに得られた応力降下量の空間分布をアスペリティやプレート間すべりの分布と比較し、関係を調べる。

(7) 平成 22 年度成果の概要：

1. 海底諸観測

2005 年宮城県沖地震の発生前後にその震源域の周囲で発生した中小地震の発震機構解から応力場の推定を行い、宮城県沖地震の震源域周辺の応力場の空間変化は小さいことが明らかとなった。推定された最大応力軸の方向は、太平洋プレートの沈み込む方向とほぼ平行で陸側にわずかに傾斜するため、プレート境界面の傾斜角が大きい宮城県沖地震震源域においては、プレート境界面に対する法線応力は、その東側領域より大きくなることが期待される（課題 1205 および 1211 でも報告）。また、2008 年に海底圧力観測で検知された非地震性すべりイベントに関する検討を進め、陸上の体積歪計でも対応する歪変動が検知されていることが明らかとなった（詳細は課題 1206 を参照）。また、海底圧力計アレイで得られたおよそ 2 年間の海底圧力変動のデータから、海域全体に共通する変動成分の抽出を行ったところ、顕著な年周変化とともに、 0.9hPa/y の経年変化（増圧）が見いだされた。この経年変化成分は、陸上 GPS 観測データの逆解析から求められたプレート間固着モデルから期待される、この海域の海底鉛直変動（沈降）と良い一致を示す（図 1）。

2. GPS 連続観測網

GPS 観測から得られる変位速度場の空間勾配の時間変化に基づいて、東北日本におけるプレート間カップリングの時空間変化の推定を試みた。国土地理院が解析・公開している GEONET 観測点の日々の座標値（F3 解）を用い、1996 年 3 月 22 日から最近までの 5 年分の各観測点の日座標値時系列から、一週間ずつ期間をずらしながら切り出して処理を行い、過去 5 年間及び過去 1 年間の平均的な変位速度を得た。得られた変位速度場から、プレート収束方向にほぼ平行な成分の水平変位速度、および上下変位速度の空間勾配を算出した。水平変位はプレート境界のうち浅い部分（深さ約 50 km 以浅）での固着が強くなると大きな負の勾配（太平洋側の観測点ほど大きく陸側へ変位）を持つようになり、固着が弱いと勾配は 0 に近くなる。余効すべりやスロースリップイベントが発生すると、時として正の勾配（太平洋側の観測点ほど大きく海側へ変位）が求められることになる。図 2 に水平変位勾配の時空間変化を示す。

2005 年 8 月 16 日の宮城県沖地震（M7.2）、2003 年十勝沖地震（M8.0）の余効すべりの発生に対応して、それぞれの震源域周辺において水平変位勾配が正の値をとる時期が 1～2 年ほど継続している。また、福島県沖から茨城県沖にかけての領域（図中北緯 37～38 度付近）では、2008 年末ころから過去 1

年間の変位から求めた変位勾配が大きくなっており、固着の弱化もしくは準静的すべりが沖合で発生していたことを示唆している。これは、平成 21 年度の成果として小繰り返し地震の解析から報告された、福島県沖から茨城県沖にかけての海溝軸周辺でのすべりの加速に対応しているものと考えられる。過去 5 年間の平均でみると、この時期にはほとんど変位勾配の値に変化がない一方で、過去 1 年間の平均変位速度から求めたものには大きな変化があり、2008 年の早い時期からすべりの加速が始まったこととも対応している。

3. 相似地震データ解析

小繰り返し地震の自動抽出により、プレート境界の準静的すべりのモニタリングを継続した。これまで、2008 年に福島県、茨城県のはるか沖合での準静的すべりの加速があり、宮城県沖合まで達したことが推定されていたが、2009 年、2010 年ではその加速状態がしだいに小さくなる傾向が見られた(図 3)。これは、宮城県沖およびその南部の固着が再び強まり始めていることを示すと考えられ、前項の GPS データ解析から得られた、水平変位勾配の時空間変化とも調和的である。

4. 地下水位観測

借用していた孔井の一部を返却することになり、22 年度は水位・水温観測の 2 孔井、ラドン・CO₂ 濃度観測の 3 孔井の体制で「深層地下水変動観測システム」を連続稼働させた。また、2004 年から 2007 年までの観測結果を論文にまとめた(2 月に公表される予定)。同様に 2008 年から 2009 年の観測結果を地質学雑誌に投稿した。上記の期間のデータに関して、潮汐成分検出プログラム BAYTAP-G を用いて気圧・潮汐補正を施した他、理論潮汐計算プログラム GOTIC2 を併用して、観測の分解能を検定した。その結果、観測サイト NM の水位換算体積歪分解能は 2.3×10^{-9} 、観測サイト AT の水位換算体積歪分解能は 0.5×10^{-9} 、同 AT での水温換算体積歪分解能は 1.0×10^{-8} と見積もられた。これまで「深層地下水変動観測システム」は 11 の地震に関する post-seismic な水位と水温の変動を観測した。それらのデータから、観測限界は $M = 2.3 \times \log(r) + 1.0$ (M は気象庁マグニチュード、r は震源距離(km))によって近似される(図 4)。また、水位変動の極性が理論静的体積歪の正負と調和する観測事例 7 つに関しては、MICAP-G で計算した体積歪と水位換算体積歪から計算される水位変動量の期待値と観測値された水位変動とがよく一致することが分かった(図 5)。

====平成 23 年度の成果====

「課題番号：9100」

本課題では、近い将来発生することが懸念されていた宮城県沖地震の震源域周辺における総合的なモニタリングを進めてきた。2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)の破壊の開始点は、こうした重点観測が行われている宮城県沖の海底下にあったため、本震 2 日前の 3 月 9 日に発生した M7.3 の前震を含め、本震とそれに至る過程を克明に記録することができた。

図 6 は海底地震計のデータを加えることにより再決定された、3 月 9 日の前震とその余震および 3 月 11 日の本震の震源分布である。本震に至るまでの地震活動の中心は、その破壊の開始点より海溝側に広がっている。この領域は通常から地震活動が活発な地域であり、2005 年に発生した宮城県沖の地震の発生直後や 2008 年に、M6 程度の地震を含む群発的な地震活動が見られている。今回の前震活動の震央分布を、海底地震観測のデータを用いて決定された 2002~2009 年の震央分布と比較すると、良い一致を示しており、定常的な地震活動と前震活動の分布パターンの中に明瞭な差異を見いだすことはできない。

前震による地震時地殻変動は、陸上の GPS 観測網とともに宮城県沖の海域に設置された海底圧力計によって観測されている。すべり一定の矩形断層を仮定して、これらのデータから前震の断層モデルを推定すると図 6 のようになる。前震の震央分布の広がりや、推定された断層の東側では大局的に一致しているが、破壊の開始点より陸側では、断層が推定された範囲の余震活動が低調である。しばしば指摘されているような、地震時すべり量と余震活動の相補的関係を仮定すれば、この余震活動が低調な領域はすべり量が特に大きかった領域に対応するのかもしれない。

日本海溝で発生する M7 級の地震では余効変動がしばしば観測される。3 月 9 日の地震後にも余効すべりが認められた。図 7 は歪計・GPS および海底圧力計によって捉えられた 3 月 9 日の地震後の地

殻変動である。地震発生後も継続する変動が共通に捉えられており、余効すべりがあったことが強く示唆される。現時点では、すべり量とその分布の推定には至っていないものの、GPSで観測された変位ベクトルの方向を、3月9日の地震時とそれ以後の期間とで比較すると、地震後の期間は有意に南側に偏っており(図8)、このことは余効すべりが前震の震源域よりも南側に拡大したことを示唆する。3月9日の前震後の地震活動が南側に拡大する傾向にあったことが指摘されているが(たとえば、Ando and Imanishi, EPS, 2011)、こうした地震活動の空間変化は余効すべりの拡大に伴ったものである可能性が高い。

本震の破壊開始直後には3秒間程度の初期破壊フェーズがあったことが指摘されているが(Ide et al., Science, 2011)、この初期破壊フェーズから大振幅の主破壊に移行する様子は、海底地震計の波形記録でも認めることができる。初期フェーズの継続時間は観測点ごとに異なっており、主破壊の開始点が初期破壊の開始点(初動走時から決定される震源)と一致しないことがわかる。そこで、震源と主破壊の開始点との相対的な位置関係を推定したところ、主破壊の開始点は震源の5.2 km 東側にあつて、初期破壊開始との時間差が3.3秒であったことがわかった(図6)。

本震の破壊によるすべり量は平均でも20mを超えており、それに伴う大規模な地殻変動が海陸で観測されている。宮城県沖の海底では、GPS/音響結合式(GPS/A)地殻変動観測によって最大31mの水平変位が観測された(課題番号1217, Sato et al., Science, 2011)他、海底圧力計によって最大5mの隆起が観測されている(課題番号1206)。こうした海底地殻変動観測の結果と陸上GPS観測の結果をあわせて断層すべり分布を推定した結果を図9に示す。これによれば、地震時すべりが特に大きいのは震源よりも海溝側の領域であつて、50mを超えるような非常に大きなすべりがあつたと推定される。この領域では地震時の動的破壊が自由表面(海溝軸の海底)にまで及んだという指摘もあり(Ide et al., Science, 2011)、推定されたきわめて大きなすべりはその影響であると考えられる。一方で、海溝近傍のすべりが大きかった領域の南北方向の拡がりも50 km程度と、震源断層の長さには比べれば小さい。自由表面にまで破壊が及んだ領域は破壊の開始点のすぐ東側の範囲に限られており、そうした破壊は海溝軸に沿った進展をあまり見せなかったためと推測される。

本震後はGPS観測点で余効すべりによると考えられる変動が見られており、本学が展開しているGPS観測網でもそうした変動が捉えられている。海底圧力観測でも対応する変動が捉えられているが、宮城県の内陸部分では隆起が見られているのに対して、海底では沈降傾向にあることは興味深い。

こうした地震・測地的な観測に基づく研究の他、地球化学的なモニタリングも進めている。福島県立医科大学(福島市)の通気式電離箱のデータを用いて、東北地方太平洋沖地震前の大気中ラドン濃度変動を解析した。屋外空気中のラドン濃度に関係する通気式電離箱での測定指示値は、年周変動しながら経年的に減少する傾向にあつたが、2010年6月頃から年周変動のパターンが崩れるとともに増加傾向に転じた。同年12月初旬からは指示値は減少を始めたが、その後東北地方太平洋沖地震の本震時までほぼ一定の値で推移していたことが明らかとなった。

- (8)平成22年度の成果に関連の深いもので、平成22年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
飯沼卓史・松澤暢・長谷川昭，2010，変位勾配から見た東北日本広域のプレート間カップリングの時空間変化，日本測地学会第114回講演会要旨集，77-78。
伊藤喜宏・稲津大祐・長田幸仁・三浦哲・内田直希・大園真子・木戸元之・太田雄策・三品正明・日野亮太・藤本博己・辻健・芦寿一郎，海底観測および陸上観測で捉えた日本海溝のゆっくり地震，日本測地学会第114回講演会要旨集，95-96。
鹿島雄介・南須原美・中村隆志・山内常生・大槻憲四郎，2011，宮城県沖大地震の前兆を捉えるための深層地下水変動研究：2008年2月～2009年12月の観測結果，地質学雑誌(査読中)
南須原美恵・鹿島雄介・中村隆志・山内常生・大槻憲四郎，2011，宮城県沖大地震の前兆を捉えるための深層地下水変動研究：2004年6月～2007年12月の観測結果，地質学雑誌，117(2)，63-78。
Uchida, N., T. Matsuzawa, J. Nakajima, A. Hasegawa, and N. Umino, Subduction of a Wedge-shaped Philippine Sea Plate beneath Kanto, Central Japan, and its Effect on Interplate Coupling, 2010 Western Pacific

(9) 平成 23 年度実施計画の概要 :

平成 23 年度は引き続き宮城沖において海底地震計, 海底圧力計, GPS-音響測距結合方式海底測地観測による総合的な海底諸観測, また, 陸域において地震, 地殻変動観測, さらに深井戸における水位・水温観測を継続し, 宮城沖のプレート間すべり・応力場の時空間変化の把握のための観測的研究, 技術開発, データ解析手法の改良等を実施する「深層地下水変動観測システム」については, 地下水のラドンと CO₂ 濃度の観測は 2008 年から開始したが, 稼働中の温泉施設を利用しているため, 人為的変動を如何に低減せるかが課題であった。データが蓄積されてきたので, 人為的変動の補正を含め, 本格的な解析を始める。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

日野亮太, 長濱裕幸, 内田直希, 太田雄策, 他計 10 名程度

他機関との共同研究の有無 : 有

東京大学地震研究所, 海洋研究開発機構, 海上保安庁, 気象庁地震火山部, 仙台管区气象台 (海底観測)

(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 : 東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

電話 : 022-225-1950

e-mail : zisin-yoti@aob.geophys.tohoku.ac.jp

URL : <http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/>

(12) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 日野亮太

所属 : 東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

電話 : 022-225-1950

FAX : 022-264-3292

e-mail : hino@aob.geophys.tohoku.ac.jp

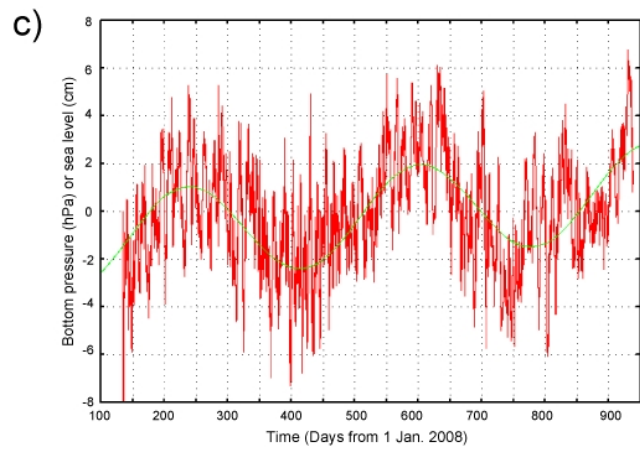
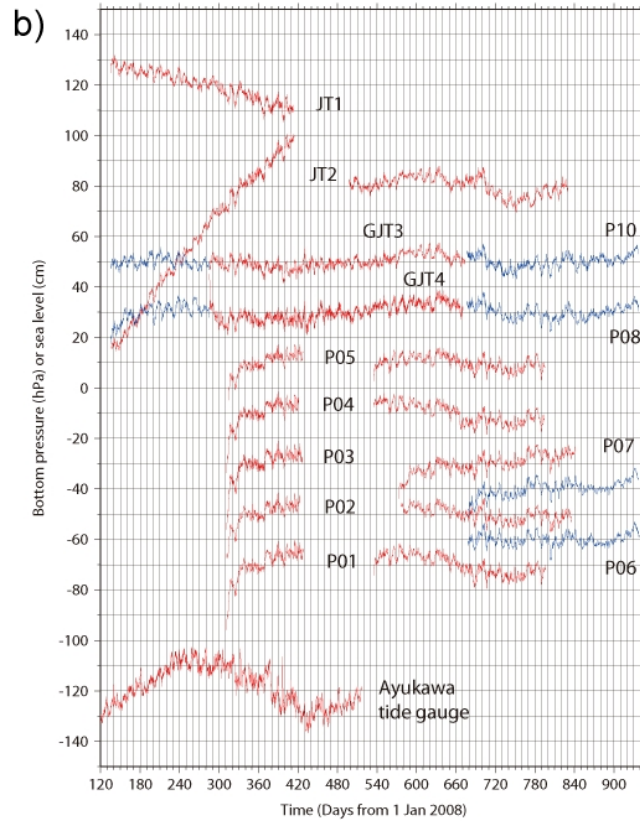
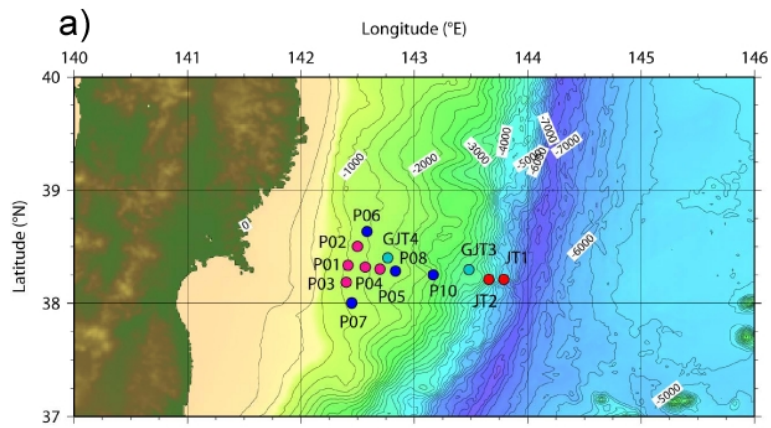


図 1：宮城県沖における海底圧力変動。

a) 観測点配置 . b) 各観測点で得られた圧力変動 (海底潮汐成分を除去したもの) . c) 全観測点のデータをスタックすることにより得られた、領域全体における圧力変動 (赤) と、それから最小二乗法により推定した年周と経年変化 (緑) .

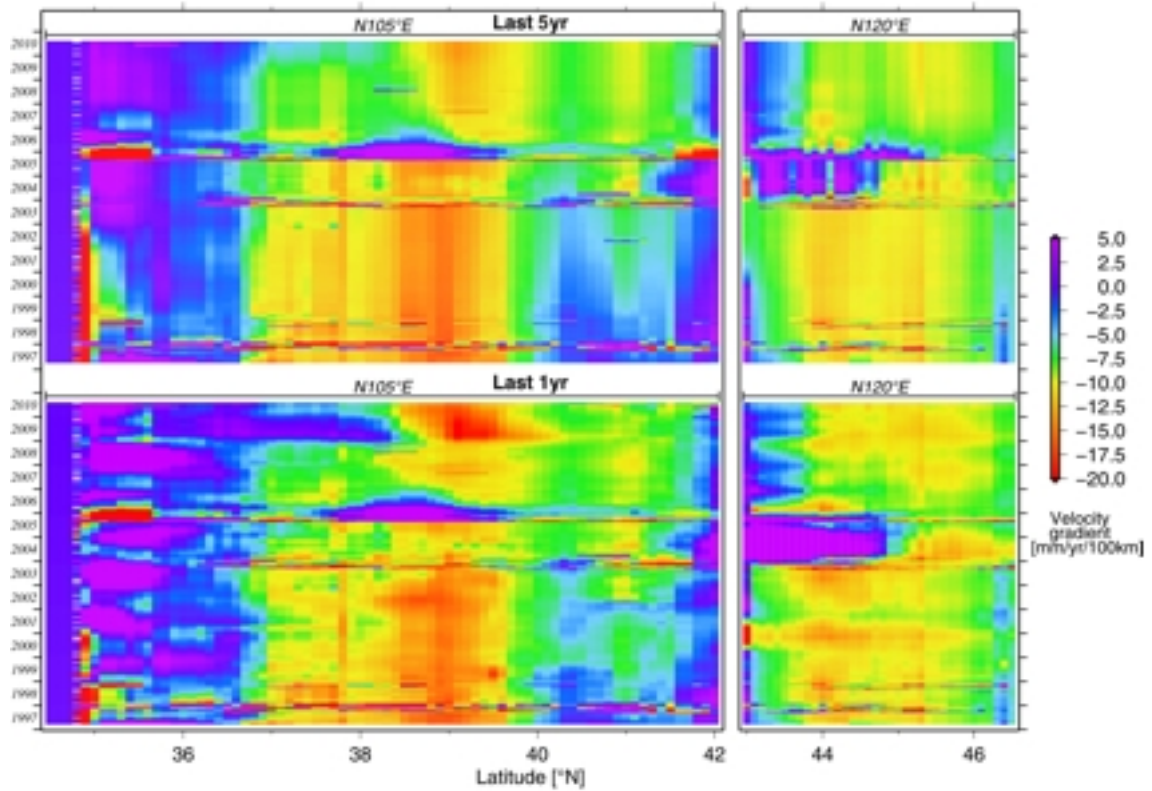


図 2 : GEONET 観測点における太平洋プレート沈み込み方向の水平変位勾配の時空間変化 .
 横軸は , 変位勾配を計算するために設定した帯状の各領域 (東北日本では N105 °E 方向 , 北海道では N120 °E 方向に設定) の中心線と東経 140 度線との交点の緯度 , 縦軸は時間を示す . 上段は過去 5 年間の平均変位速度場から , 下段は過去 1 年間の平均変位速度場から , それぞれ変位勾配を計算したものの .

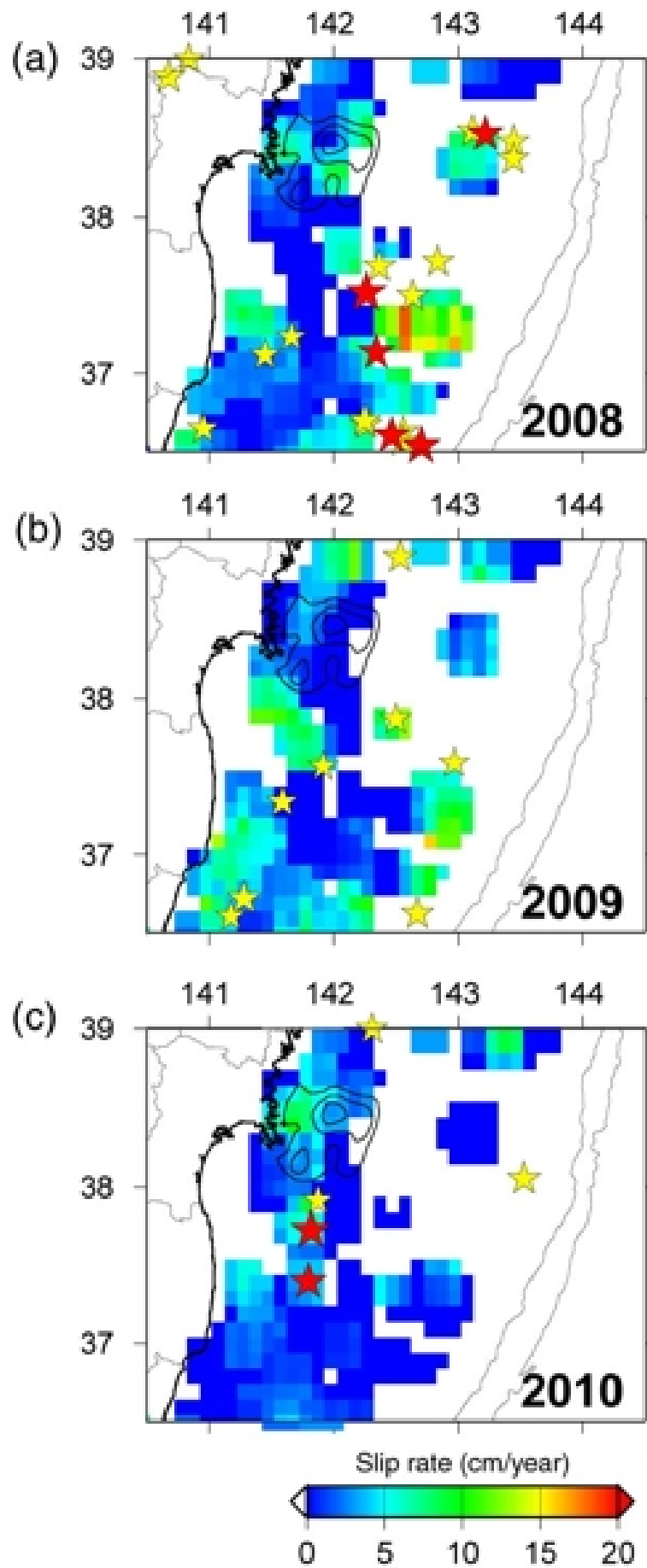


図3：小繰り返し地震データにより推定されたプレート境界でのすべりレートの分布．
 a-c はそれぞれ，2008年，2009年，2010年の結果を示す．星は70km以浅の地震の震央を示し，赤色はM5以上，
 黄色はM6以上のものを示す．

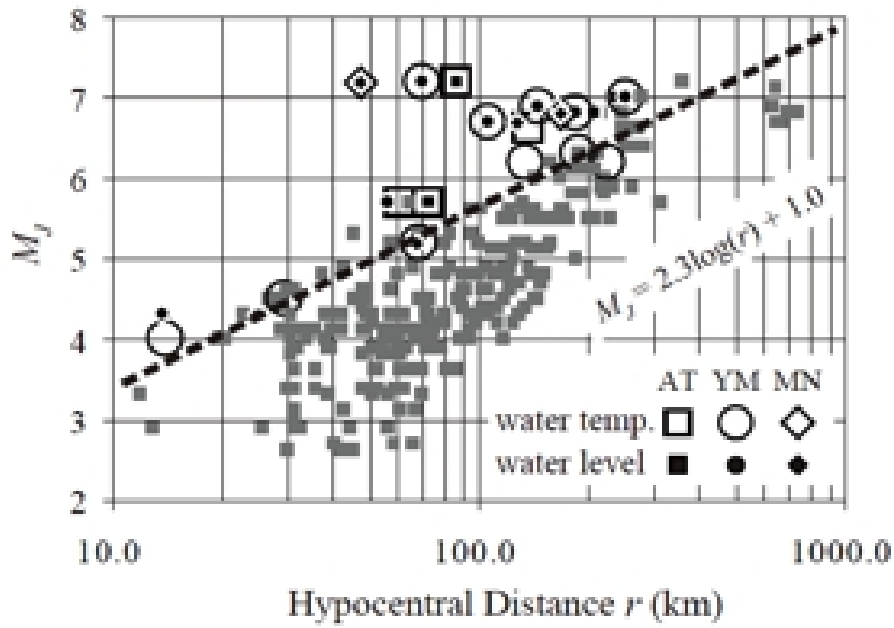


図4：震源距離 r と地震の気象庁マグニチュード M_J との関係。
 小さい灰色四角は観測サイト AT, YM, および MN のいずれでも地下水変動が検出できなかった地震。それ以外のシンボルは水温か水位の post-seismic な変動として検出された地震。変動の検出限界（破線）は図に書き入れた式で近似される。

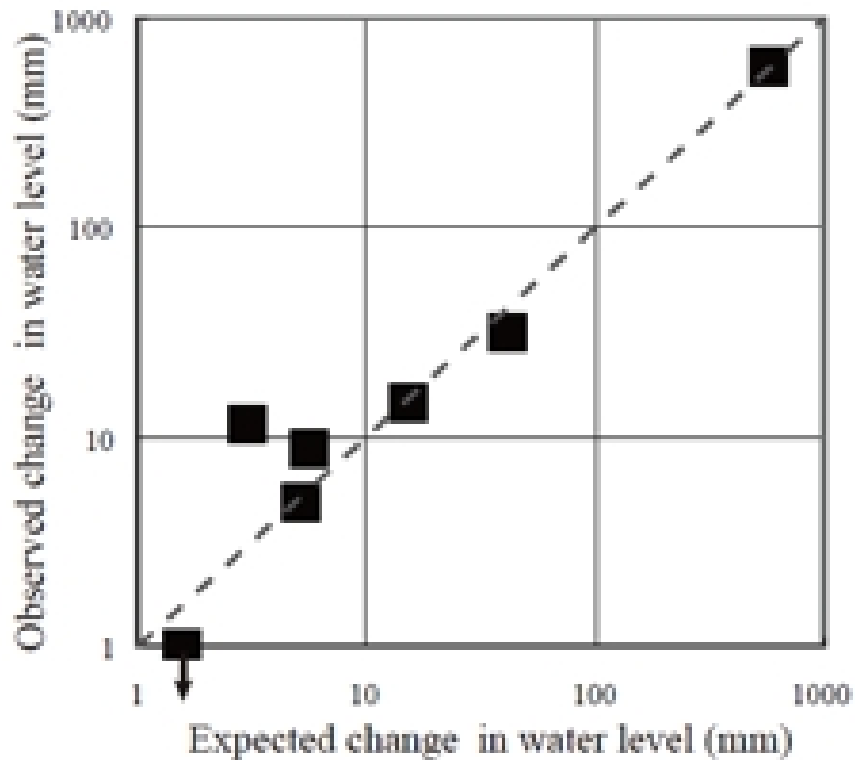


図5：地震による静的体積歪変化（MICAP-G での計算値）と水位換算体積歪から計算される水位変動の期待値と水位変動の観測値との関係。
 両者はよく一致し，post-seismic な水位変動の要因の一つが静的歪変化であることを示唆する。

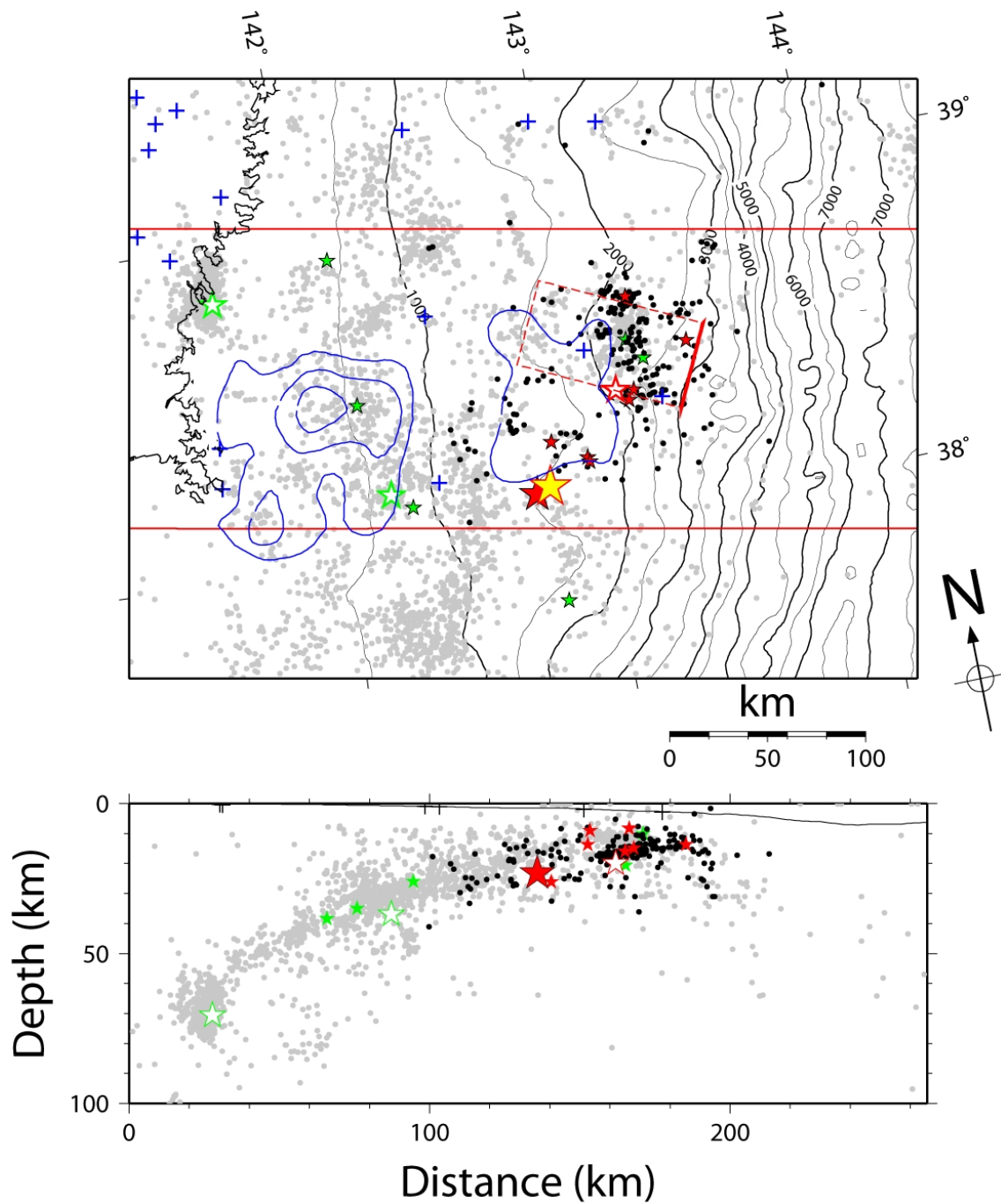


図 6

2011年3月9日に発生したM7.3の前震(赤白抜星)から3月11日のM9.0の本震(赤大星)までに発生した地震の震源分布(黒丸)。小赤星はこの間に発生した地震のうちM6級のもの。灰色丸は2002年から2009年までの地震のうち、OBSのデータを使って走時残差0.5秒以下で決定されたもので、そのうち、M6以上のものを緑星でM7以上のものを緑白抜星で示した。震央分布中の黄色星は観測波形にみられる大振幅位相の立ち上がりと初動との走時差から推定した主破壊の開始点。赤色矩形は前震に対する断層モデル。

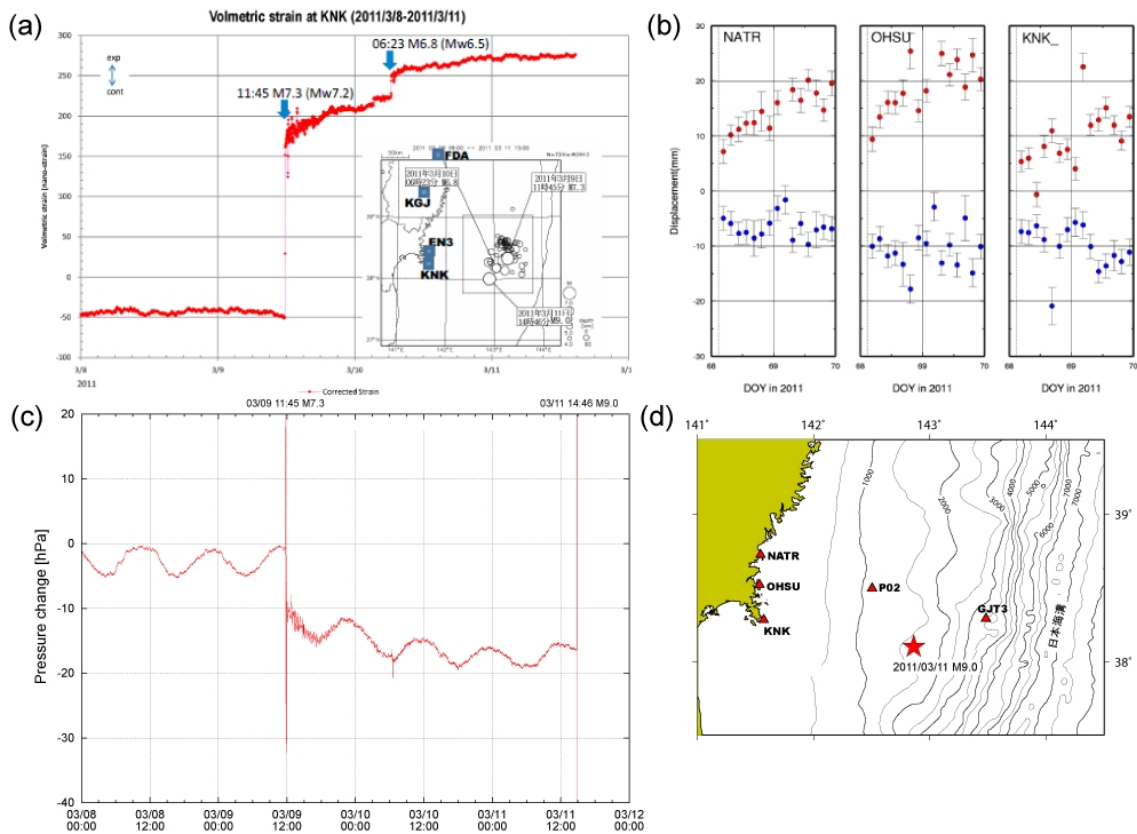


図 7

(a) 3/9 の前震前後における KNK 観測点における体積歪の変化。(b) 宮城県沿岸域の GPS 観測点における東西(赤)および南北(青)各成分の変位時系列。誤差棒は 3 の信頼区間。(c) 海底圧力の時間変化。GJT3 と P02 観測点の圧力差を示した。(d) 観測点配置。

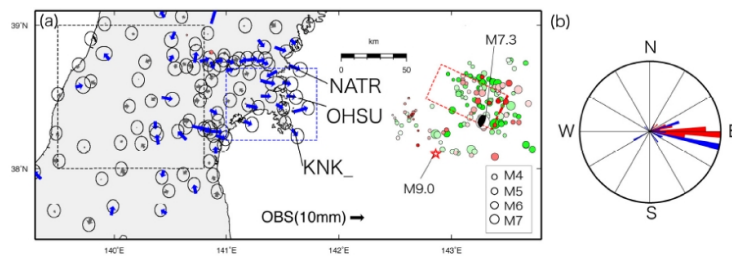


図 8

(a) 各 GPS 観測点での 3/9 から 3/10 までの変位ベクトル。灰色矩形内での平均を求め、それを各観測点での変位から差し引いてある。(b) (a) の青色矩形領域内の観測点における変位方向のローズダイアグラム。赤は前震の地震時変動、青は地震後の余効変動によるもの。

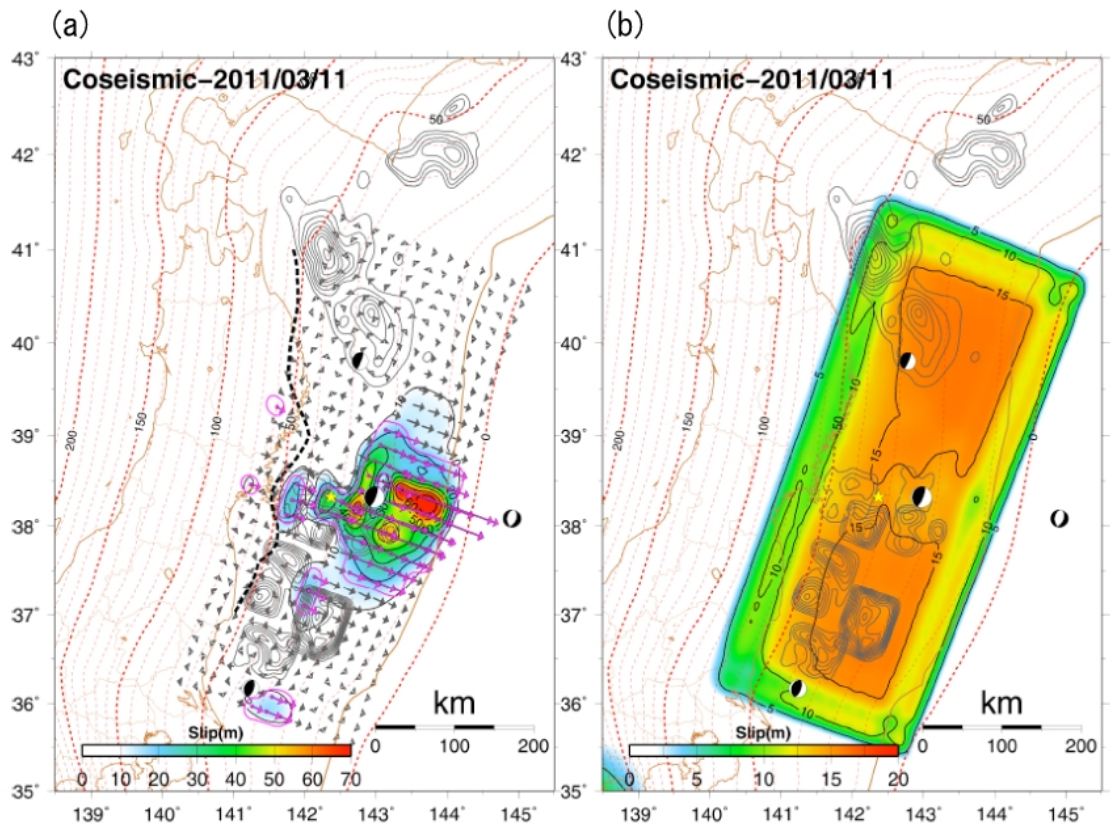


図 9

(a) 海陸の地殻変動観測データを用いて推定された地震時変位分布．すべり分布の等値線間隔は 10m．(b) 推定誤差の空間分布．等値線間隔は 5m．