

### 3. 研究報告

#### 3. 1 短期海底地震観測および陸上地震・測地観測によるプレート間すべりに関する研究

##### (1) 業務の内容

###### (a) 業務題目

宮城県沖地震アスペリティ周辺におけるプレート間すべりのモニタリングの実現

###### (b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
国立大学法人東北大学大学院理学研究科	教授	松澤暢	matuzawa@aob. gp. tohoku. ac. jp
	准教授	三浦哲	miura@aob. gp. tohoku. ac. jp
	准教授	日野亮太	hino@aob. gp. tohoku. ac. jp
	准教授	中島淳一	nakajima@aob. gp. tohoku. ac. jp
	助教	内田直希	uchida@aob. gp. tohoku. ac. jp
	助教	伊藤喜宏	yito@aob. gp. tohoku. ac. jp
	研究員	飯沼卓史	iinuma@aob. gp. tohoku. ac. jp
	技術職員	平原聡	
	技術職員	中山貴史	
	技術職員	鈴木秀市	
研究補佐員	荻荘幸代		

###### (c) 業務の目的

M7.5級のプレート境界型地震が繰り返し発生する宮城県沖では、次の地震の発生が切迫していると考えられており、その発生時期および規模の予測精度の向上が急がれる。本業務では、宮城県沖地震時に破壊すると考えられるアスペリティの固着状況やその周囲における準静的すべりの状態が時空間的にどのように変化しているかを監視するための方策を開発することを目的とする。

アスペリティの状況把握の高度化のためには、プレート境界面の形状や境界面とその周囲における中小の地震活動の空間分布を高精度で明らかにする必要があり、文部科学省事業である「宮城県沖地震に関するパイロット的な重点調査観測」（以下「パイロット重点観測」と称する）によってこの領域において開始された海底地震観測網による長期繰り返し地震観測を発展的に継続することによりこれを実現する。

アスペリティ周囲での準静的すべりの時空間的な変動を監視するためには、本業務ではGPS観測による地表面の変位速度分布からプレート境界面上でのすべり分布を推定し、その時間変化を捉えること、プレート境界面上での小繰り返し地震である相似地震のすべり量と震源分布からすべり分布を推定し、その時間変化を捉えることが効果的であると考えられる。特に「監視」という観点からは、高信頼度のすべり量分布を迅速に推定することが重要であり、そのための技術開発を推進する。

###### (d) 5カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成17年度：

これまでに宮城県沖の周辺で行われた地震観測のデータを解析し、2005年8月16日に発生したM7.2の地震の破壊域を詳細に明らかにするとともに、1930年代や1978年に発生した過去の宮城県沖地震の破壊域との関係を考察した。また、震源域とその周辺における地震波速度構造モデルを構築した。さらに、GPS観測および相似地震活動の解析に基づき、宮城県沖周辺における準静的すべりの実態把握を開始した。

2) 平成18年度：

海底地震計の入れ替えにより、平成17年度に観測を開始した5点の海底観測点における地震観測を継続するとともに、気象庁と共同して4～10月の間、短期観測型海底地震計を用いた機動的な海底地震観測を行った。こうした観測により新たに得られたデータを従来の海底地震観測データに加え、想定震源域周辺の精密な震源分布を求めた。さらに、GPS観測および相似地震活動の解析に基づき、宮城県沖周辺における準静的すべりの実態把握を継続した。

3) 平成19年度：

海底地震計の入れ替えにより、平成18年度に観測を開始した6点の海底観測点における地震観測を継続するとともに、気象庁と共同して4～10月の間、短期観測型海底地震計を用いた機動的な海底地震観測を行った。こうした観測により新たに得られたデータを従来の海底地震観測データに加え、想定震源域周辺の詳細な地震活動、地震波速度構造および発震機構解の推定を行った。さらに、GPS観測および相似地震活動による準静的すべり状態の監視の継続・改良を行い、宮城県沖周辺における準静的すべりの実態把握を行った。

4) 平成20年度：

海底地震計の入れ替えにより、繰り返し海底地震観測を継続するとともに、気象庁と共同して短期観測型海底地震計を用いた機動的な海底地震観測を行った。こうした観測により新たに得られたデータを従来の海底地震観測データに加え、プレート境界面上および面外それぞれにおける地震活動の分離を行い、それぞれの位置での地震活動特性の抽出に努めた。さらに、GPS連続観測および相似地震活動の解析の準リアルタイム化に基づく、宮城県沖周辺における準静的すべり状態の監視システムの開発を進めた。

5) 平成21年度：

海底地震計の入れ替えにより、繰り返し海底地震観測を継続するとともに、気象庁と共同して短期観測型海底地震計を用いた機動的な海底地震観測を行う。こうした観測により新たに得られるデータを従来の海底地震観測データに加え、プレート境界面内・外の地震活動度およびその特性の時空間的な変動の解明に努める。さらに、GPS観測および相似地震活動の解析の準リアルタイム化に基づく、宮城県沖周辺における準静的すべり状態の監視システムの実用化に目途をつける。

(e) 平成21年度業務目的

2005年に発生した宮城県沖の地震の破壊域周辺におけるプレート間非地震性すべりの分布および時間変化を明らかにするとともに、プレート境界面における固着・すべり分布に対応する地震波速度構造の解明を目標として、以下のような目的で業務を実施する。

東北大学大学院理学研究科の地震・噴火予知研究観測センターにおいてリアルタイムで収録される陸上地震観測点の波形データを用いた相似地震解析を行い、宮城県沖地震の想定震源域周囲におけるプレート間すべり分布の推定を、平成 20 年度に引き続いて実施し、平成 20 年度までの成果との比較を行うことにより、プレート間すべりの時空間変化に関する情報の蓄積を図る。

また、東北大学が東北地方広域に展開する GPS 観測網のデータを国土地理院の GEONET 観測網により得られるデータと統合し、各観測点における日平均座標値時系列を得るとともに、これを基に宮城県沖地震の想定震源域周辺ならびに東北日本広域のプレート間固着状態の推定を行い、平成 20 年度までの成果との比較を行うことにより、プレート間すべりの時空間変化に関する情報の蓄積を図る。

短期観測型海底地震計を用いて、地震観測を行う。これにより、東京大学地震研究所が実施する長期観測型海底地震計による観測とあわせ、陸上の地震観測データと総合して、想定震源域周辺の地震波速度構造の推定を行うとともに、詳細な震源分布を明らかにする。

地殻変動と地震活動をもとにしたプレート間すべりモニタリングのさらなる高度化を目的として、海底圧力観測を開始することにより、海底地殻上下変動の検出を試みる。

## (2) 平成 21 年度の成果

### (a) 業務の要約

相似地震モニタリングについて、最新のデータに基づくモニタリングを継続し、2008 年以降の宮城県～茨城県沖合の海溝近傍での準静的すべりが速い状況が、次第に小さくなりながらも 2009 年も続いていたことが分かった。本年度はこのすべりの詳細を調査し、GPS 解析との比較も行った。

2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震の余効変動について、海上保安庁海洋情報部の海底地殻変動観測点において得られた水平変位データを含めた解析を再度行い、余効すべりの時空間発展を推定した。海底地殻変動観測点における変位が定常状態と思われるレートに落ち着いた 2007 年 1 月下旬以降、2005 年の地震震央周辺でのすべりがほとんど見られなくなっており、この領域でのプレート間カップリングが回復していることが示唆される結果を得た。

東北日本広域のプレート間カップリングの時空間変化を把握するため、GPS 観測から得られた地表変位を基に、プレート間でのバックスリップ（すべり欠損）の分布を推定するための手法を改良した。また、毎週新しく得られたデータに対してこの手法を自動的に適用する準リアルタイムモニタリングのための解析ルーチンを開発し、過去の GEONET データに適用した。2008 年 5 月の茨城県沖の地震の後では宮城県沖から茨城県沖にかけての沖側の広い領域でバックスリップが弱くなっていることなど、相似地震解析から得られたプレート間すべり分布の時空間変化とほぼ整合的な結果を得ることができた。

2005 年の宮城県沖の地震の余震活動を解析し、震源域における応力場についての考察を行った。本震破壊域東端付近の余震クラスターについて詳細な解析を行い、多くの地震は本震の地震時すべりによる応力変化によって引き起こされていることを明らかにした。

### (b) 業務の実施方法

相似地震（小繰り返し地震）解析に関しては、これまでと同様に対象領域で発生した新しい地震について一定の基準に合致するものを相似地震とし、モニタリングを継続した。Nadeau and Johnson (1998)<sup>1)</sup>のスケーリング則を用いて相似地震の積算すべりを計算し、これをプレート境界での準静的すべりとしてその時空間変化を推定した。

GEONET ならびに東北大学の GPS 観測点から得られたデータを解析して、変位時系列データを得るとともに、海上保安庁海洋情報部から海底地殻変動観測点におけるデータの提供を受け、これらをあわせて時間依存逆解析手法を適用し、プレート境界におけるすべりの時空間発展を推定した。

地表変位データから地下の断層面上のすべり（もしくはすべり欠損）の分布を推定する逆解析手法の改良を行った (Iinuma, 2009)<sup>2)</sup>。この手法を用いたルーチン解析のための数値計算コードならびにスクリプト群の開発および環境整備を行った。構築した自動解析システムを用いて過去の GEONET データに手法を適用した。

Yamamoto et al. (2008)<sup>3)</sup>によって推定された三次元地震波速度構造を用いて、2005年8月16日の宮城県沖の地震の余震の震源再決定を行った。震源決定後、メカニズム解を求め、応力テンソルインバージョン (Ito et al., 2009)<sup>4)</sup> 並びに本震の地震時すべりによる・CFF の計算を行い、それぞれの結果についての考察を行った。

高精度水晶式圧力計をセンサーとし、長期間連続して海底での水圧を観測できる海底圧力計を宮城県沖に設置し、海底上下変動を検知するための観測を実施した。

### (c) 業務の成果

#### 1) 相似地震モニタリング

図 1 は、2009 年一年間に東北日本下のプレート境界において発生した相似地震の分布を示したものである。相似地震の判定基準としては、震央間距離 40 km 以内の過去の地震と波形を比較し、P 波・S 波を含む 40 秒間で 1-8 Hz の平均のコヒーレンスが 0.95 以上となるものを相似地震とみなすこととした。2008 年は前年(2007 年)に比べ約 1.5 倍の数の相似地震が発生したが、2009 年も 2007 年に比べ 1.3 倍の相似地震が発生した。2008 年に M7.0 (5 月 8 日, 茨城県沖) および M6.9 (7 月 19 日, 福島県沖) のプレート境界型地震が発生した東北地方南部で特に活動が活発であった。

これらの地震 (2008 年 5 月 8 日の茨城県沖の M7.0 の地震と 2008 年 7 月 19 日の福島県沖の M6.9 の地震) を含む領域のプレート間の準静的すべりの分布を図 2 に示す。2008 年にそれまでと比べて速いすべりが宮城県～茨城県の沖合の海溝近くで見られる (図 2c)。2009 年に入っても同領域は 2007 年以前よりも速い状態にあり、広域での大規模なすべり現象があったことが示唆される (図 2d)。図 3 はこのすべりレートを、プレート収束速度 (8.5 cm/year) をもとにすべり欠損レートに変換したものである。2005 年 8 月 16 日の地震以前についてみると、宮城県沖ではバックスリッププレートが大きく、比較的固着が強いことが分かるが、2006 年を見ると 8 月 16 日の地震の震央 (黄色い星) の周辺で若干固着が弱くなっている様子が見られる。2007 年に入ると、8 月 16 日の地震の南で若干固着が弱いようには見えるが、震源近くの固着は回復しているように見える。さらに 2008 年には先述の 5 月 8 日の茨城県沖の M7.0 の地震と 7 月 19 日の福島県沖の M6.9 の地震に関連すると思われる固着の弱まりが見られる。

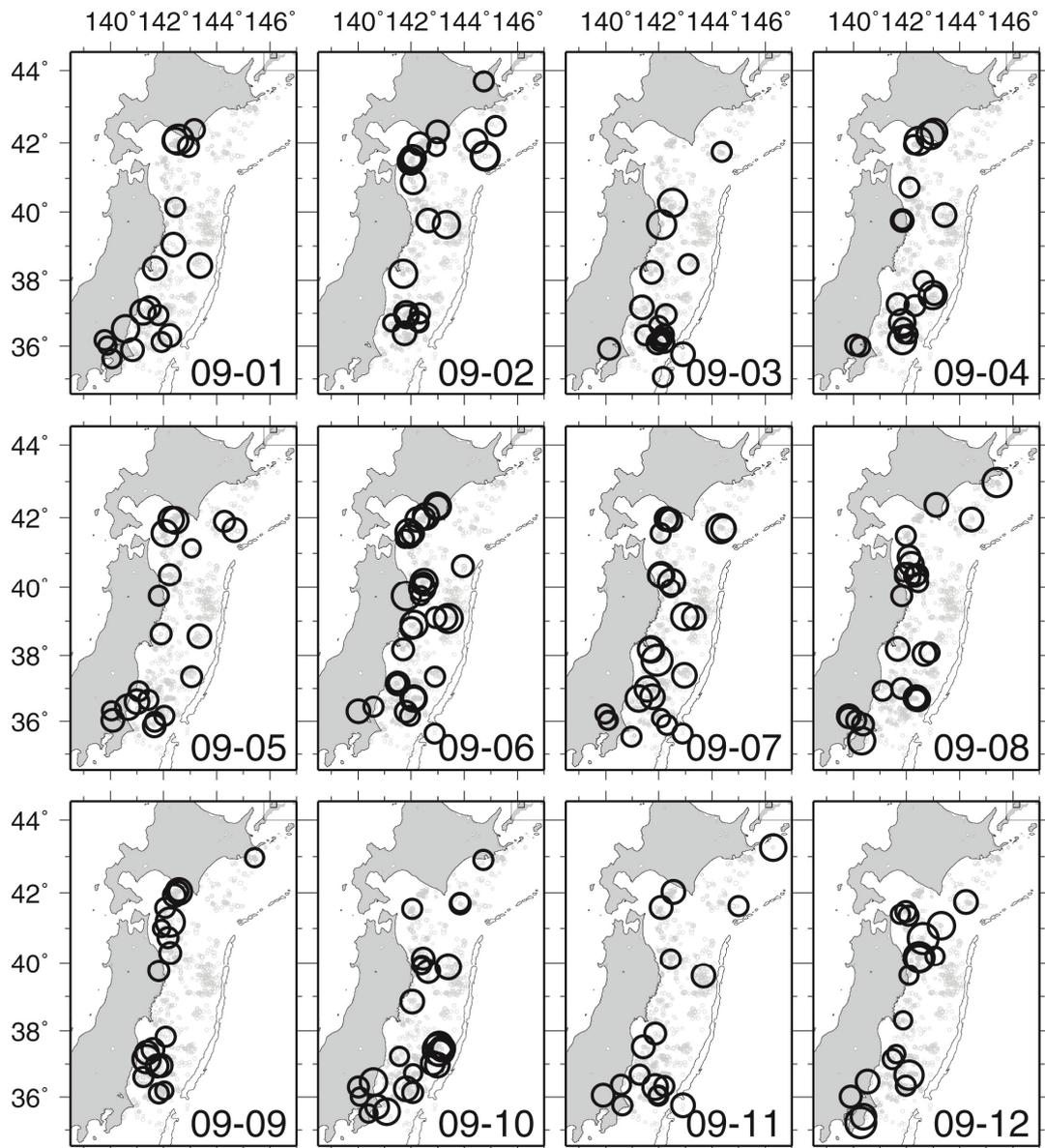


図1 2009年の一年間に発生した相似地震の分布。1月から12月まで月ごとに示す。

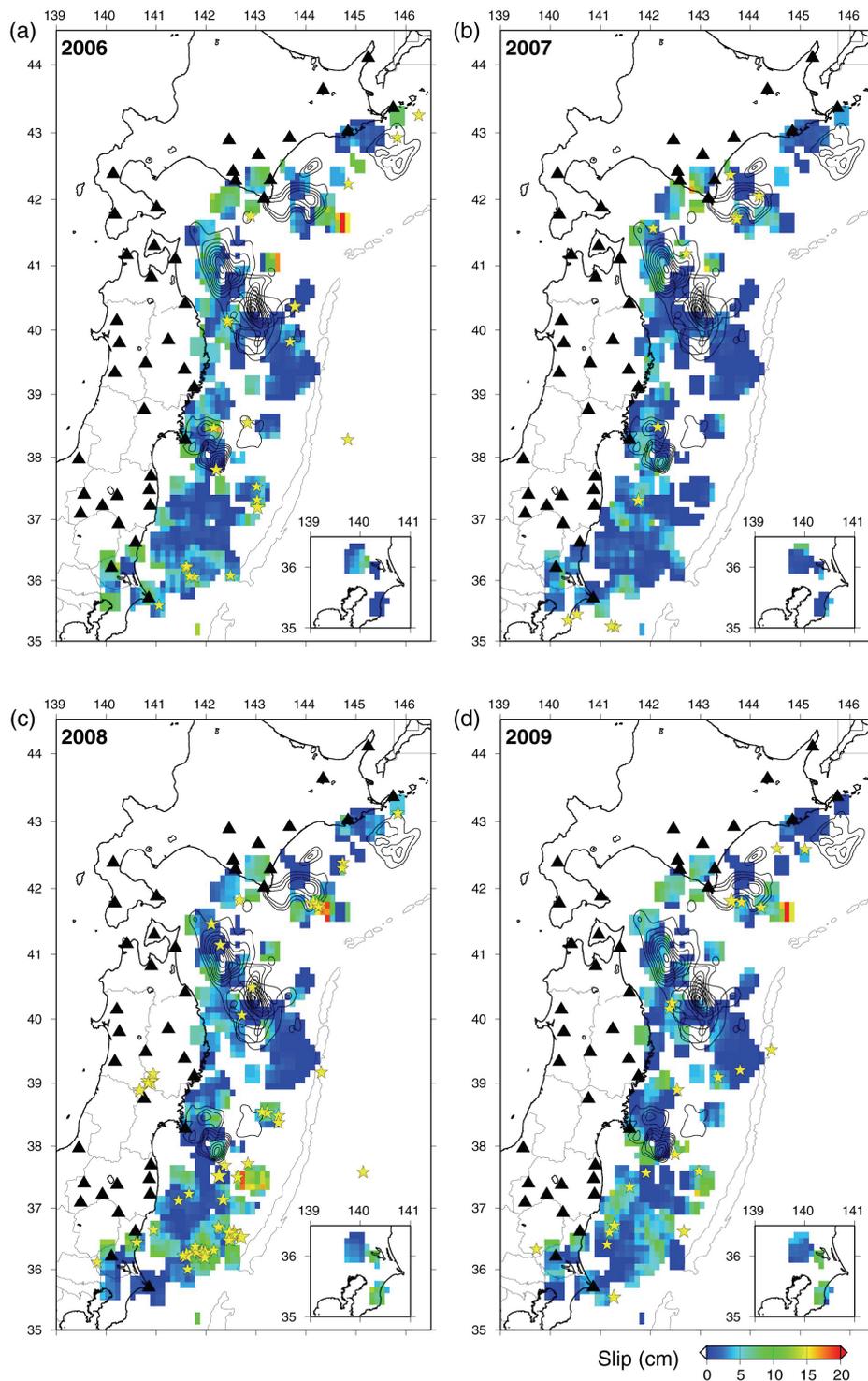


図 2 相似地震活動から推定されたプレート境界面上での準静的滑り分布。それぞれ、1年間のすべりを示す。星は深さ 80km 以浅、M5 以上の地震の震央を示す。黒三角は小繰り返し地震の同定に用いた観測点、コンターは Yamanaka and Kikuchi (2003; 2004)<sup>5), 6)</sup> による M7 以上の地震のアスぺリティ。挿入図はフィリピン海プレート上部境界でのすべりレートを示す。

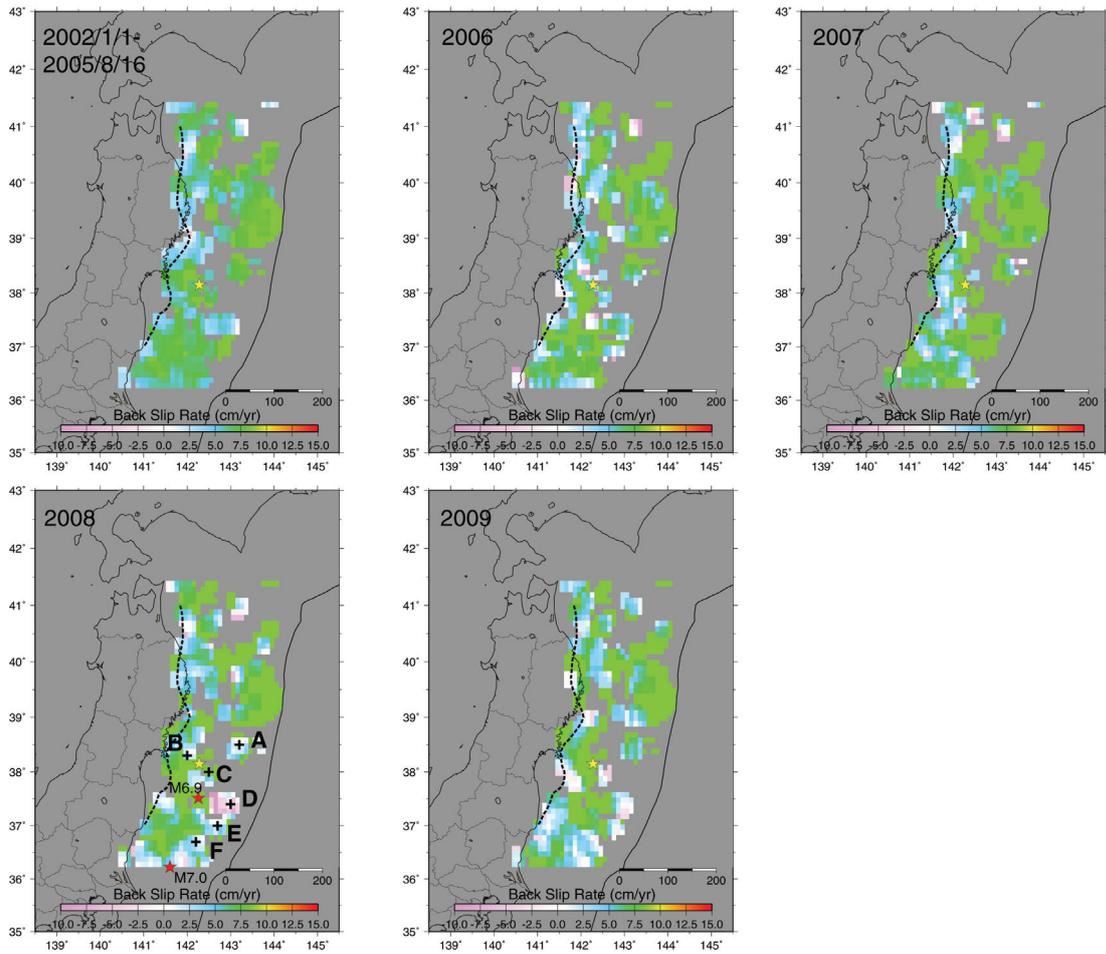


図 3 相似地震により推定されたすべりレートより計算されたすべり欠損レート。相似地震の積算すべりから推定したすべりレートからプレート収束速度 (8.5cm/year) を差し引くことにより推定した。ピンク色の領域はフォワードスリップ領域を示す。黄色星は 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震(M7.2)、赤星は、2008 年 5 月 8 日の茨城県沖の地震(M7.0) および 2008 年 7 月 19 日の福島県沖の地震(M6.9)の震央を示す。

破線は Igarashi et al. (2001) <sup>7)</sup>による低角逆断層型地震の西縁を示す。2005 年の地震後にあたる 2006 年はこの地震の周囲で若干固着が弱い様子が見られる。茨城県沖の地震(M7.0)および福島県沖の地震(M6.9)のプレート境界地震が発生した 2008 年から宮城県〜茨城県の沖合の海溝に沿って固着が弱まっている。

次に、すべりの時間変化について、図 3 の 2008 年の図で示したいくつかの場所（領域）での積算すべり（図 4）を見てみる。2005 年の地震（縦線 M）に関連すると考えられるすべりが領域 B、C で見られる。領域 A でのすべり加速は、この領域の近傍で 2005 年 8 月 16 日の地震の 8 日後に発生した M6.3 の地震の後に起きており、2005 年 8 月 16 日の地震の地震と直接関係するかどうかは分からない。一方、2008 年 5 月 8 日の地震（縦線 I）を含む一連の活動に関連すると考えられるすべりは領域 A、C、D、E、F で見られる。この中で、領域 D、F やその南でのすべりは、平成 20 年度の本研究の成果報告書で述べた（図 5 に再掲）ように、2008 年 5 月 8 日の地震の前から始まっているように見える。このすべりは、2008 年 5 月の地震後、その周辺（領域 E、F）で加速するほか、2008 年 7 月 19 日に 5 月の地震より北の福島県沖で M6.9 の地震が発生（図 3 赤星）し、領域 D でさらに加速がみられ、さらに北の領域 A でも 2008 年 12 月から加速がみられた。

このように、日本海溝に沿った南北およそ 300 km にわたる領域での準静的すべりの加速が 2008 年から見られた。そのすべりは、北緯 36.5 度（領域 F 付近）から始まり主に北に広がった。なおこのような海溝沿いの南北への準静的すべりの拡大は、1992 年三陸沖地震 (M6.9) や 1994 年三陸はるか沖地震 (M7.6) の余効すべり (Uchida et al., 2004)<sup>8)</sup>でもみられた。海溝沿い（プレート境界浅部、固着域の up-dip 側）では準静的すべりが広がりやすい性質がある可能性がある。

地震活動と準静的すべりのどちらが先行したかについては、最初の地震の前にもすべりが若干加速していた可能性もある（図 4）が、Matsuzawa et al. (2004)<sup>9)</sup>でモデル化されているように、両者の相互作用がすべり加速の拡大に重要な役割を果たしていると考えられる。

2008 年すべりの拡大の途中には 2 つの M7 クラスの地震があり、すべりの拡大は間欠的に起きている可能性が高いが、最初に活動があった領域 F 付近と最後に活発化した A 付近の距離 (270 km) とその間の期間 (10 ヶ月) から全体のすべりの拡大速度を計算すると 1 km/day 程度となる。なお、前述の 1992 年および 1994 年の地震後のすべりの南北伝播は、おおまかに計算すると、両方とも 10 km/day 程度となる（それぞれ論文中の領域 E、領域 I の加速時期をもとに推定）。

## 2) 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震の余効変動再解析

2005 年 8 月 16 日に宮城県沖を震源とする M7.2 の地震が、想定されている宮城県沖地震の震源域の一部を破壊する形で発生した。本研究で平成 18 年度に報告した解析により、本震発生後余効すべりが励起され一年余り続いていたことが明らかになった (Miura et al., 2006)<sup>10)</sup>。一方、海上保安庁海洋情報部により、GPS・音響結合方式の海底地殻変動観測点において 2006 年末頃まではほとんど動きがなかったものの、2007 年頃から 6.5 cm/year でユーラシアプレートに対して西北西に動き始めているとの発表がなされた (佐藤・他、2009)<sup>11)</sup>。同部によれば、これらの動きは、2005 年の地震を引き起こした原因である地殻ひずみの蓄積が同地震の発生により解消され、一年程度の移行期間を経て、再びひずみの蓄積が開始される過程を海底の動きとして捉えたものであると考えられる。

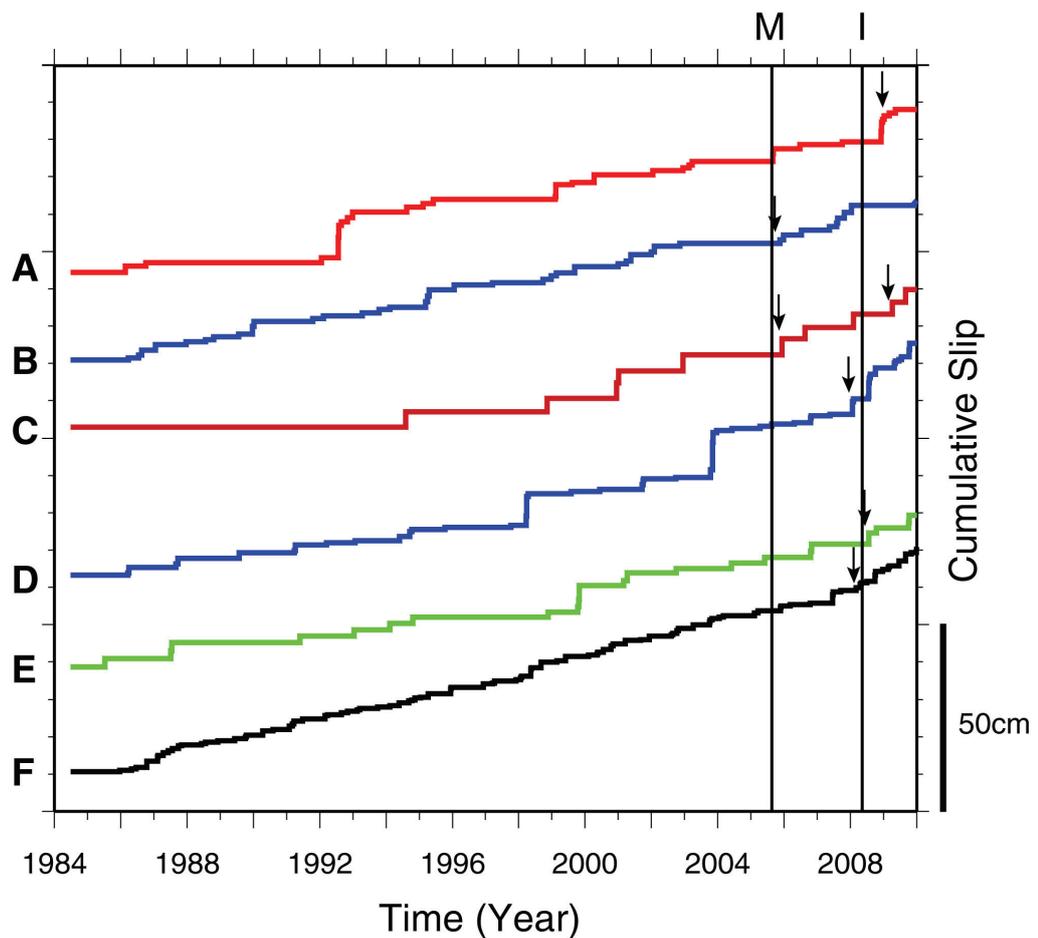


図4 図3で示したA-Fの場所（緯度，経度方向に $\pm 0.2$ 度の矩形領域）での小繰り返し地震の積算すべり。範囲内に含まれる小繰り返し地震の積算すべりの平均を示した。MおよびIはそれぞれ，2005年8月16日の宮城県沖の地震(M7.2)と2008年5月8日の茨城県沖の地震(M7.0)の発生時を示す。宮城県沖の地震後のA, B, Cの場所でのすべり加速と2008年からのBをのぞく全域でのすべり加速が見える。

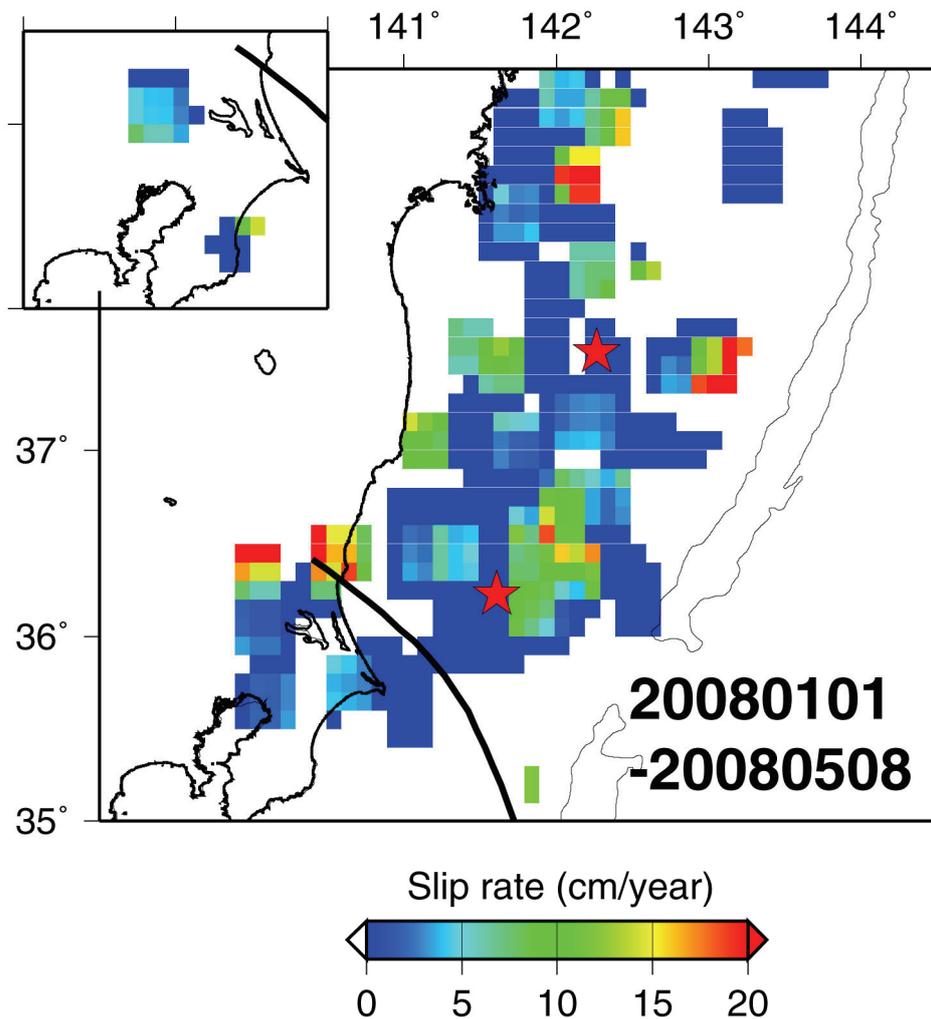


図5 相似地震活動から推定されたプレート境界面上での滑り速度分布。2008年1月から5月8日の茨城県沖の地震までの期間について示す。赤星は2008年5月（南）および7月（北）の地震の震央，黒線はフィリピン海プレートの北東限，挿入図はフィリピン海プレート上部境界でのすべりレートを示す。

これを受けて、2005年の宮城県沖の地震の余効変動に関する解析を再度行った。2004年初めから2007年末までの期間において、東北大学及びGEONETのGPS観測点によって得られたデータを、GIPSY-OASIS IIソフトウェアを用いた精密単独測位法(Zumberge et al., 1997)<sup>12)</sup>により、各観測点での変位時系列データを得た。得られた時系列データに対し、2004年1月1日から2005年8月16日の地震発生までの時系列を基に長期トレンド、年周・半年周成分を最小二乗法を用いて推定し、全期間のデータからこれらの成分を除去した。こうして得られた定常変動成分を除去した変位時系列のうち、最大余震(2005年12月2日)発生後のデータに対してYagi and Kikuchi (2003)<sup>13)</sup>の時間依存逆解析手法を適用し、プレート境界におけるすべりの時空間発展を推定した。

図6に2005年12月3日から2007年12月下旬までの期間において、12週間ごとに求めたプレート間すべりの分布を示す。2007年1月27日からの期間以降、2005年の宮城県沖の地震の震央周辺でのすべりがほとんど見られなくなっていることがわかる。この時期は海上保安庁海洋情報部から報告されている、海底地殻変動観測点における変位が定常状態と思われるレートに落ち着いていた時期と一致しており、陸上GPS点を用いた解析からも、固着が再び始まったことが示唆される結果が得られた。

プレート間すべりの積算値並びに変位との比較を図7、8に、モーメント解放量の推移を図9に示す。積算値の分布(図7)からは1978年宮城県沖地震のアスペリティ周辺で余効すべりが大きかったことがわかる。変位の観測値と計算値の比較(図8)を見ると、岩手及び秋田県内のほとんどの観測点では西向きの変位が観測されている一方、逆解析により推定された余効すべり分布では、その変位量をあまりよく説明できていない。これは、1994年の三陸はるか沖地震の震源域を含む、青森県から岩手県の沖側の領域においてプレート間の固着が強まっていることに起因していると考えられる。今回の解析で用いた各GPS観測点での変位時系列からは、2004年初めから2005年の宮城県沖の地震までのデータを用いて長期トレンドを除いているが、岩手及び秋田県内の多くの観測点においては、この長期トレンドが過小評価されていた可能性を示唆している。また、モーメント解放量の推移(図9)からは、2005年の地震の震源域周辺で、最大余震(M6.6)と同程度の歪みエネルギーが余効すべりにより解放されたこと、また、2007年前半でほぼ余効すべりが収束している様子がよくわかる。

図10、11に変位時系列を示す。陸上GPS観測点における変位は、時間依存逆解析により推定された余効すべりでよく説明できている一方、海底地殻変動観測点における変位は観測データよりも過小となっている。観測値では、定常レートに落ち着くまでに、東西成分で10 cm程度、南北成分で5 cm程度の変位が生じているが、推定された余効すべりから計算される変位は東西成分5 cm以下、南北成分で1、2 cmと、有意に小さい。これは、陸地から遠く離れた沖側のプレート境界でのすべりを検知する能力が陸上GPS観測網に十分備わっていないため、沖側で余効すべりがあっても、これを逆解析で推定することができないことに起因していると考えられる。そこで、海底地殻変動観測点のデータを海上保安庁海洋情報部から頂き、これを陸上GPS観測点で得られたデータとともに時間依存逆解析に用いることとした。

図12から15に結果を示す。海底地殻変動観測点のデータには陸上GPS点の水平成分の半分の重みをつけて解析を行った。余効すべりのスナップショット(図12)並びに

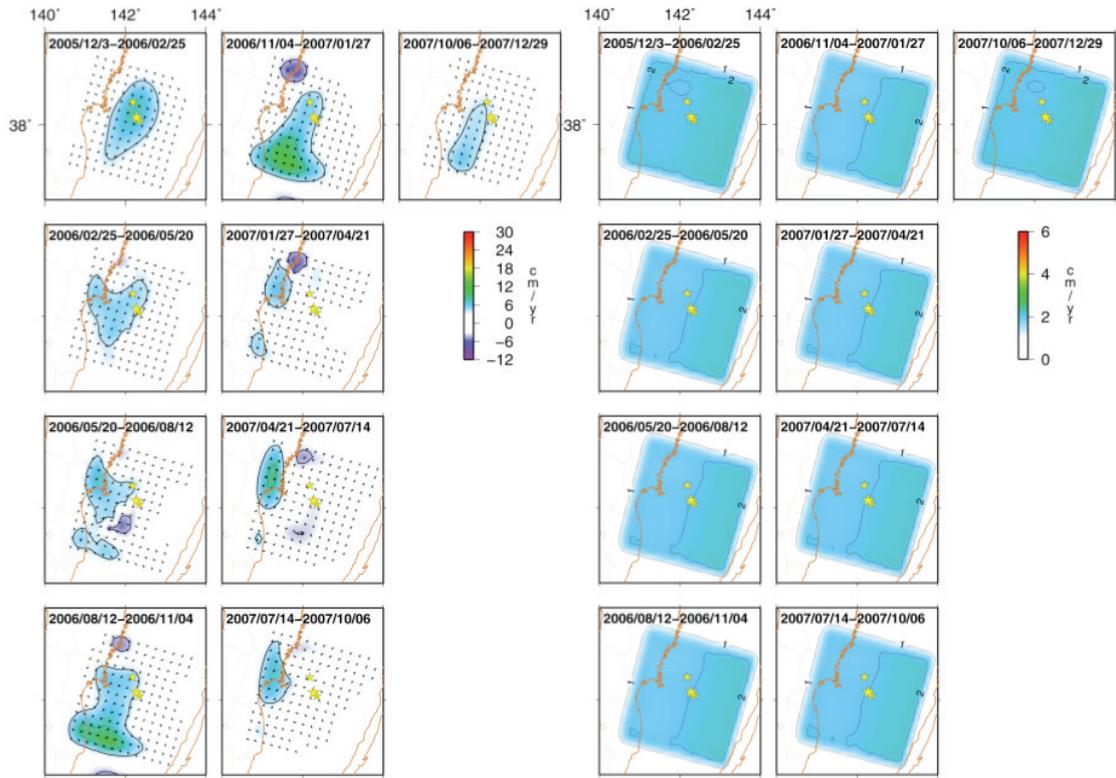


図6 (左) 陸上GPS観測点で得られた変位時系列データを元にした時間依存逆解析により推定された、2005年12月2日の最大余震以後のプレート間すべりの時空間発展。12週間ごとのスナップショットを示す。等値線間隔は4 cm/year。太い等値線は $2\sigma$ 信頼限界に相当する。(右) 各期間のすべりの推定誤差。等値線間隔は1 cm/year。

# Cumulative Aseismic Slip

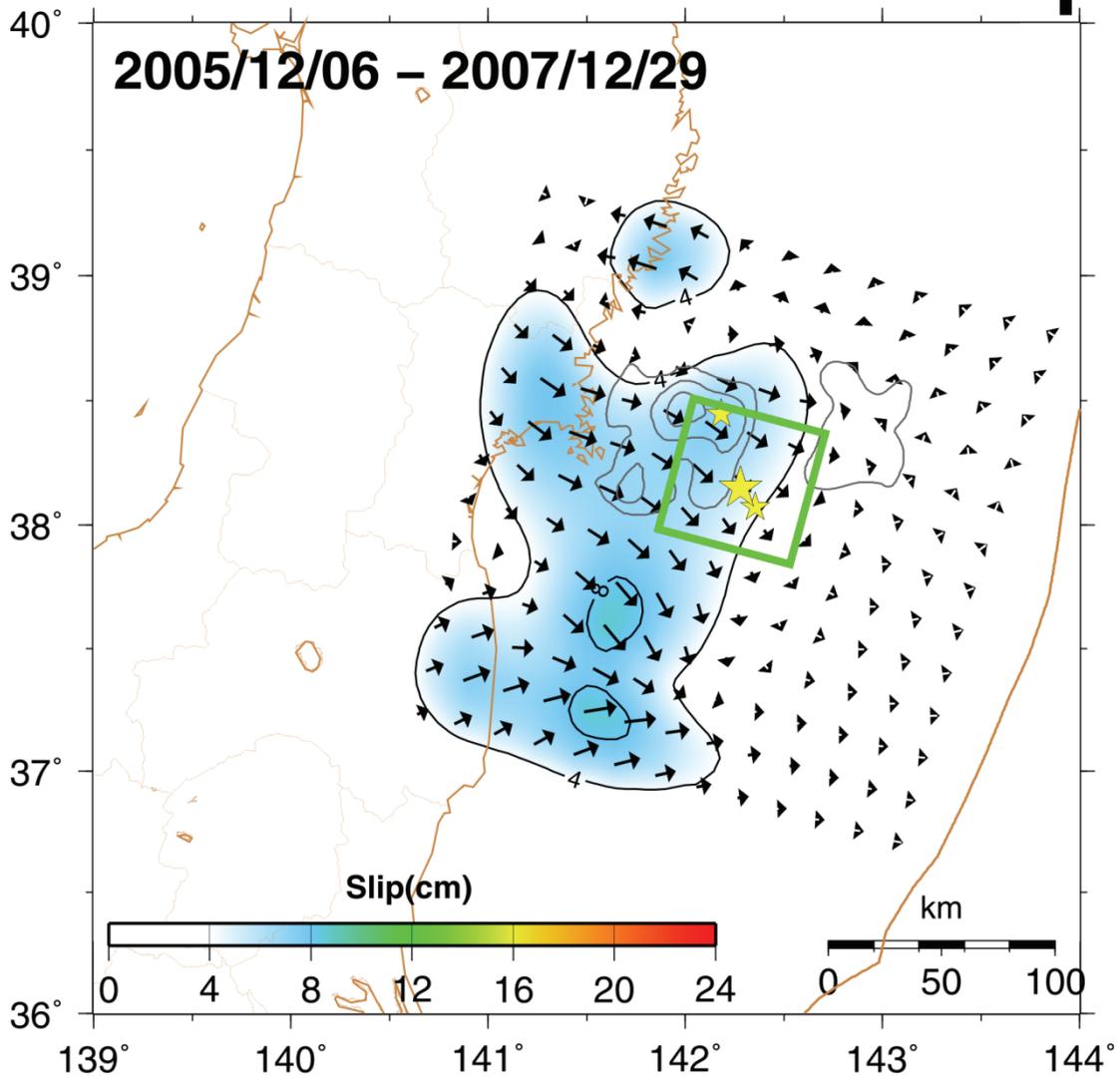


図7 陸上GPS観測点で得られた変位時系列データを元にした時間依存逆解析により推定されたプレート間すべりの積算値分布。矢印の向きはすべりの方向を示し、すべりの大きさを矢印の長さおよびカラーマップにより示した。緑線枠内でのモーメント解放量を図8に示す。灰色の等値線は1978年(陸側)・1981年(海側)の宮城県沖地震のアスペリティ(Yamanaka and Kikuchi, 2004)<sup>5)</sup>。

# Surface Displacement

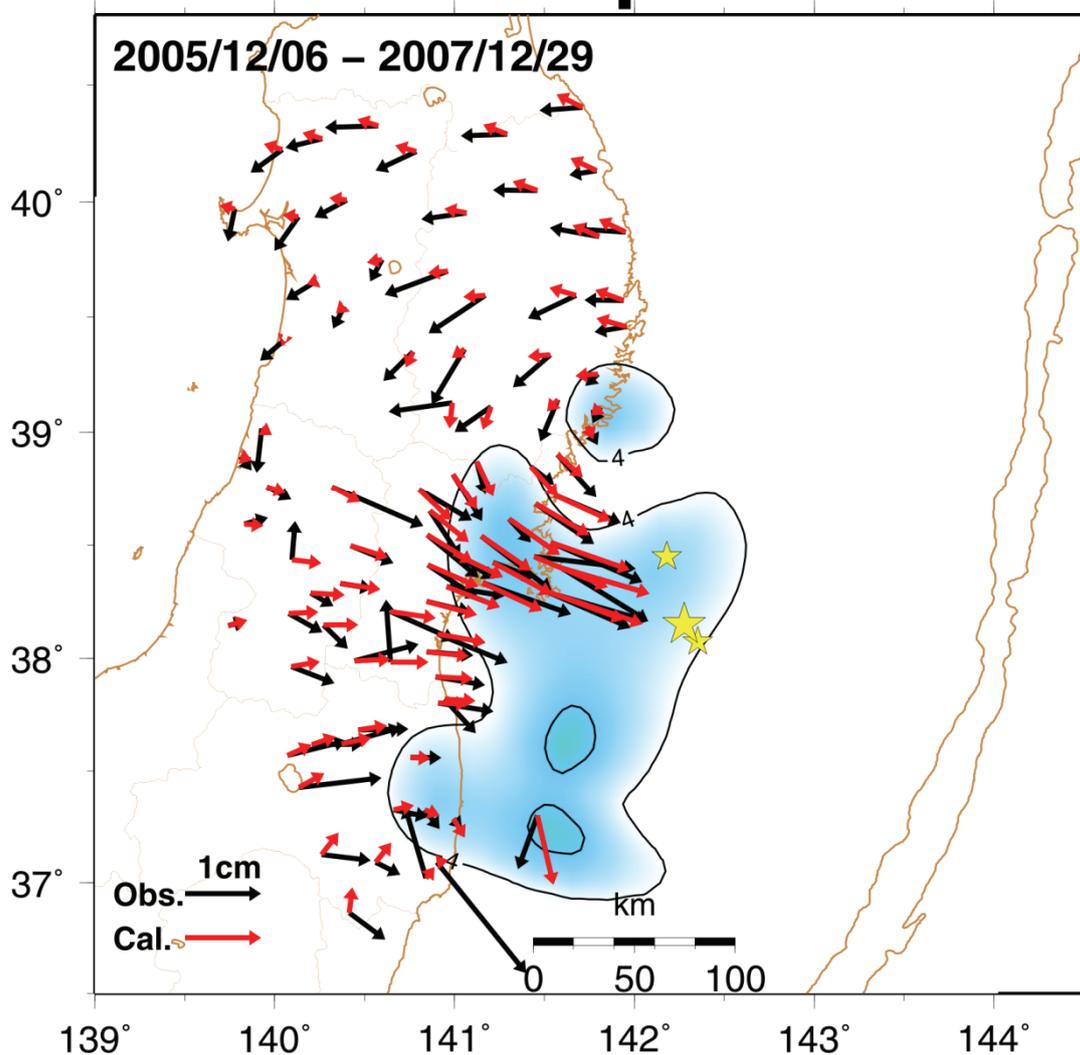


図8 陸上 GPS 観測点で得られた変位時系列データを元にした時間依存逆解析により推定されたプレート間すべりの積算値分布 (図7のものと同じ) と、観測変位 (黒矢印) と推定された余効すべり分布から計算される変位 (赤矢印) との比較。

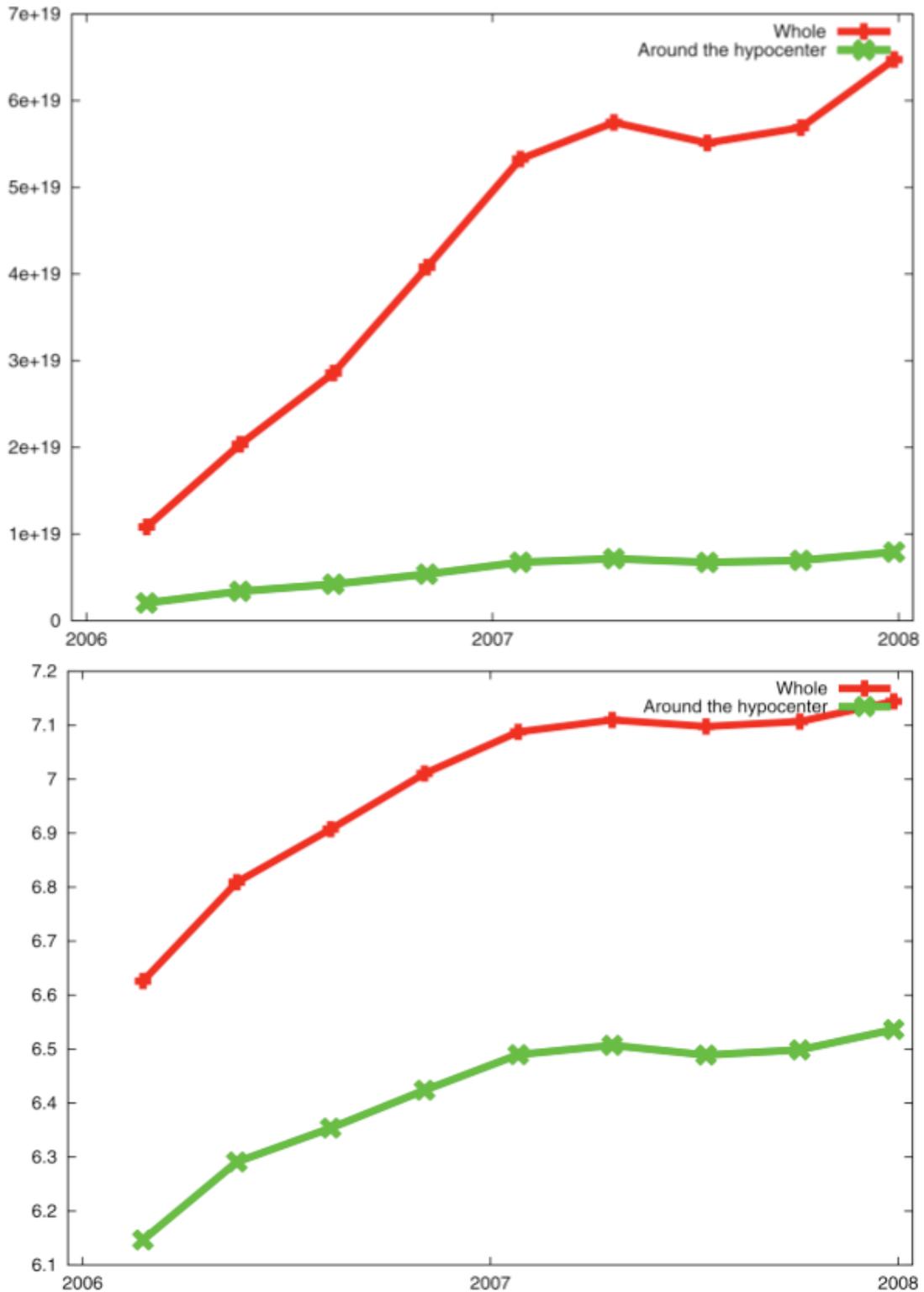


図 9 時間依存逆解析により推定されたモーメント解放量の時間推移。解析対象としたプレート境界面全体に対するものを赤、図 7 の緑線枠内について緑で示してある。上段はモーメント解放量を Nm 単位で、下段はモーメントマグニチュード相当で示す。

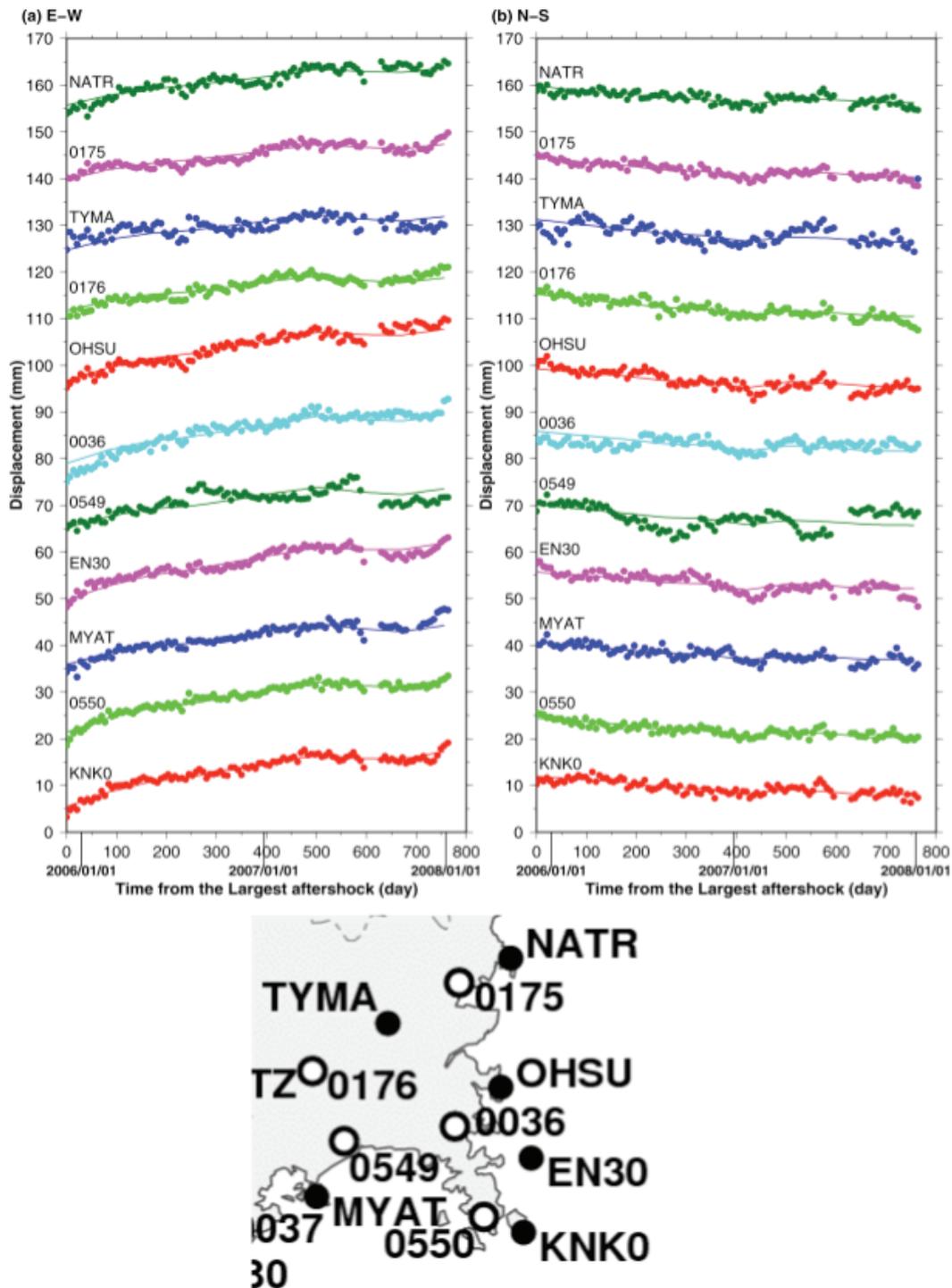


図 10 牡鹿半島周辺の GPS 観測点における変位時系列。上段右側に東西成分、左側に南北成分を示す。横軸は 2005 年 12 月 2 日（最大余震発生日）からの日数。各観測点での変位 (mm) を観測点ごとにオフセットを与えて示す。固定点は GEONET の飛島 (950194)。実線は時間依存逆解析で推定された余効すべりの時空間発展から予測される変位。下段の地図内に各観測点の位置を示す。

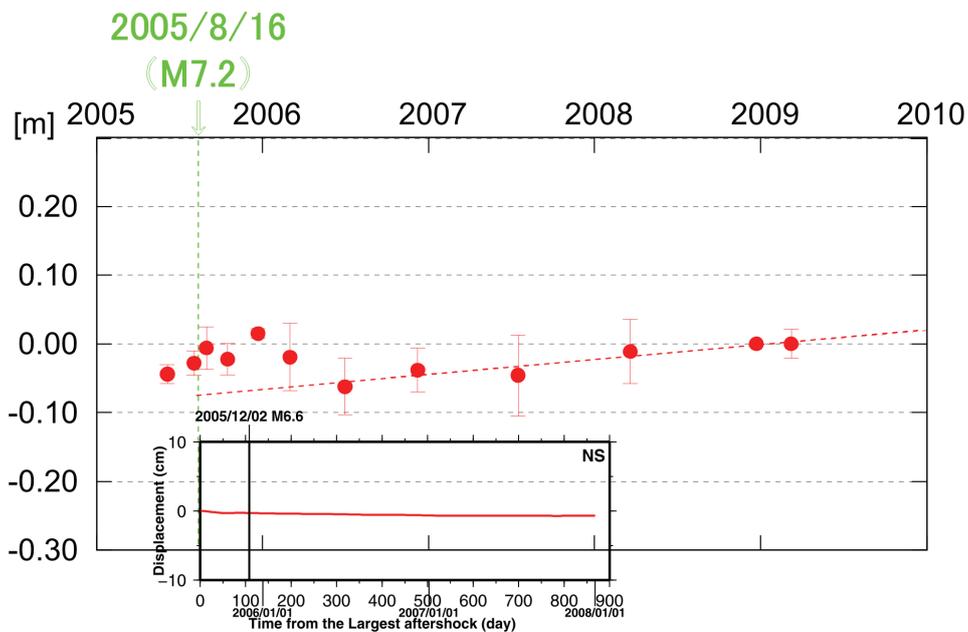
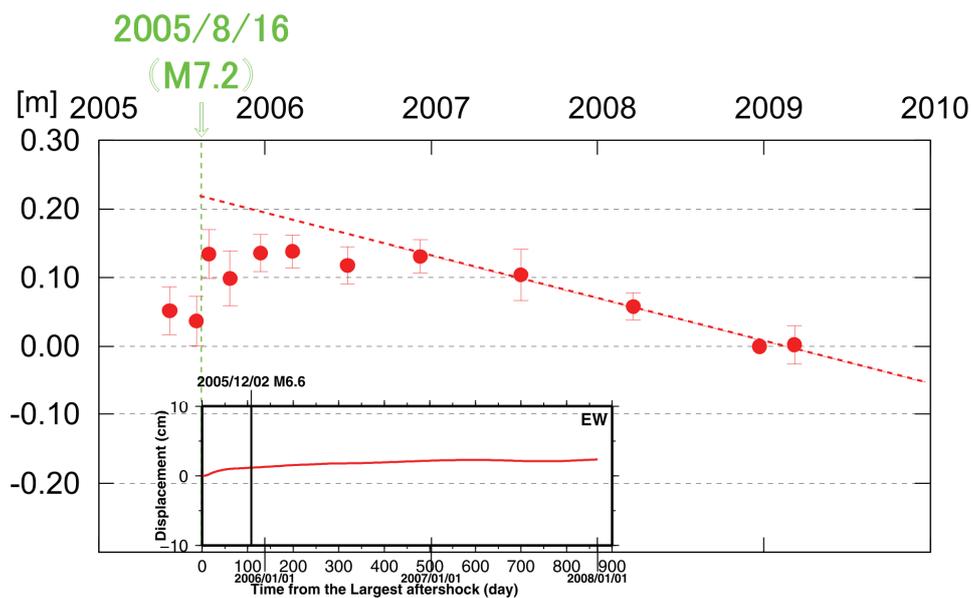


図 11 海上保安庁の海底地殻変動観測点での水平変位時系列。上段に東西成分、下段に南北成分 (m) を示す。横軸は時刻を示し、単位は年。破線は 2006 年 12 月以降の観測値から求めたトレンドを示す。縦の緑破線は 2005 年の宮城県沖の地震の発生日を示す。小さな枠内に時間依存逆解析により推定された余効すべりの時空間発展から計算される、海底地殻変動観測点での変位 (cm) を示す。横軸は時刻を示し、2005 年の宮城県沖の地震からの日数で目盛りを振ってある。横軸、縦軸とも大きな枠とスケールを合わせて表示してある。小さな枠内の縦の実線は 2005 年 12 月 2 日の最大余震発生日を示す。

積算値の分布（図 13）を陸上 GPS 観測点でのデータのみを用いた場合の結果（図 6 及び 7）と比較すると、海底地殻変動観測点の変位を説明するために、その周囲にすべりの大きな小領域が一つ増えているだけになってしまっている様子が明らかである。また、積算値の分布において、新しく求めた沖側のすべり域においては、すべりの方向がプレートの収束方向に比して南向きに偏った結果となっており、海底地殻変動観測点での変位の方向に過度に追従してしまっていることが見て取れる。これは、海底地殻変動観測点のデータを一点分のみ解析に加えたのでは、地球物理学的に有意義な結果が得られ難いことを示唆している。図 14 及び 15 に示した観測データと推定された余効すべりの時空間発展から計算される変位との食い違いは大きく、今回海底地殻変動観測データを用いることで求めた沖側のすべりが、その位置も含め定量的に正しいかどうかという点には疑義が残る結果となった。東北大学で展開しているものも含めて、何点かの海底地殻変動観測点のデータをすべて含めることにより、この件についてより正確な推定が行えるようになることが期待される。

### 3) GPS データに基づいたプレート間固着分布の準リアルタイム自動解析

宮城県沖におけるプレート間カップリングの準リアルタイムモニタリングのため、GPS データの自動処理システムを構築した。概念図を図 16 に示す。まず、GPS 観測によって得られる一次データである、搬送波位相の情報を収めた RINEX と呼ばれるファイルを収集する。東北地方に展開されている、国土地理院の GEONET 等、東北大学以外の機関によって設置された観測点と東北大学で設置した観測点で得られたデータを使用する。これらの一次データを統合的に解析し、各観測点の日平均座標値を得る。日平均座標値の時系列を二次データとして、その後の解析に用いる。

ある程度長い期間（現設定では過去 5 年分）の二次データから、長期トレンド、年周・半年周変動成分、アンテナ交換などの観測点保守作業や地震に伴うステップ状の変動を最小二乗法を用いて推定する。この際、気象庁の一元化震源データを用い、各地震の震源位置及び規模から、各 GPS 観測点において予測される地表変位を概算し、水平成分 2 mm、上下成分 5 mm 以上の変位が観測される可能性がある場合に、その地震に対してその観測点におけるステップ量を推定することにした。また、長期トレンドに関しては、

- ・過去 5 年間全体を通じて不変として一つの値を推定
- ・1 年毎に異なるトレンドを持つとして五つの値を推定
- ・5 年前から半年前までとそこから月ごとの 7 期間に対して異なるトレンドを推定

以上の三通りで推定を行い、各ケースの最後の期間のトレンドからそれぞれ過去五年間、過去一年間、過去一月間の変位速度を得、これをデータとしてバックスリップインバージョンに用いる。手法は Yabuki and Matsu'ura (1992)<sup>14)</sup>を改良したもの (Iinuma, 2009)<sup>2)</sup>を用いた。ただし、この各ケースの最後の期間に 2005 年の宮城県沖の地震の発生日（8 月 16 日）が含まれる場合は、この日以前と以後とに期間をさらに分割してトレンドを推定することとした。

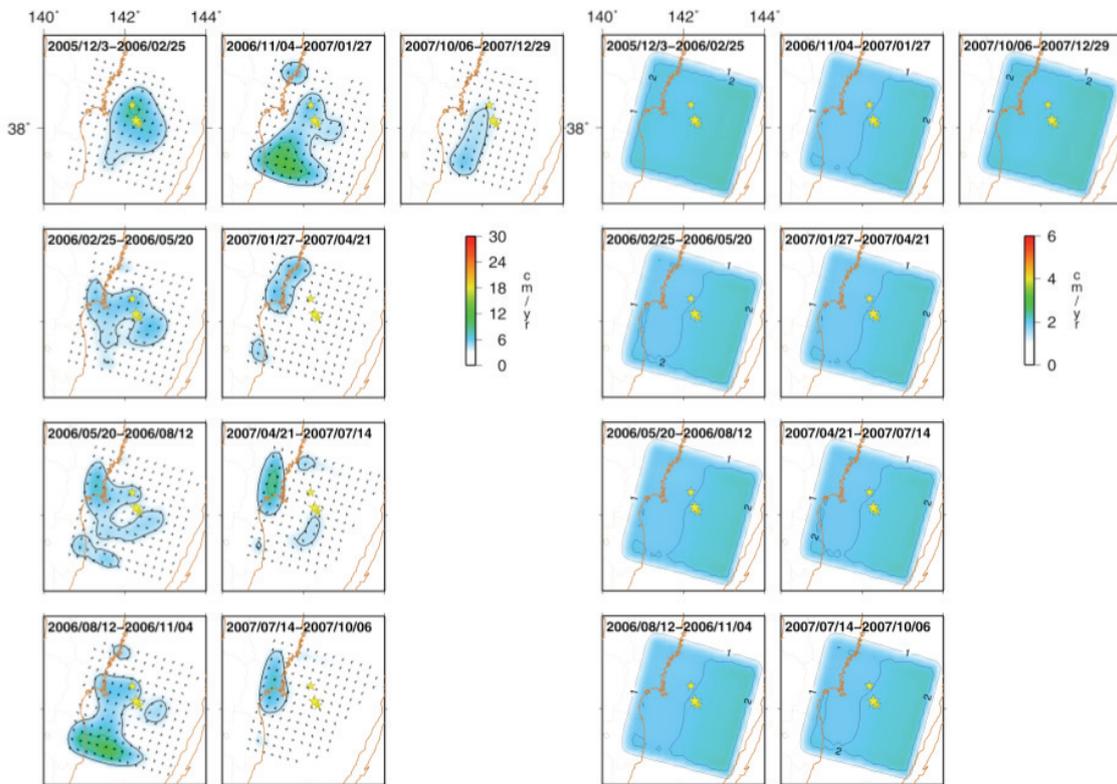


図12 (左) 陸上GPS観測点で得られた変位時系列データ並びに海上保安庁海洋情報部の海底地殻変動観測点での変位時系列データを基にした時間依存逆解析により推定された、2005年12月2日の最大余震以後のプレート間すべりの時空間発展。12週間ごとのスナップショットを示す。等値線間隔は4 cm/year。太い等値線は $2\sigma$ 信頼限界に相当する。(右) 各期間のすべりの推定誤差。等値線間隔は1 cm/year。

# Cumulative Aseismic Slip

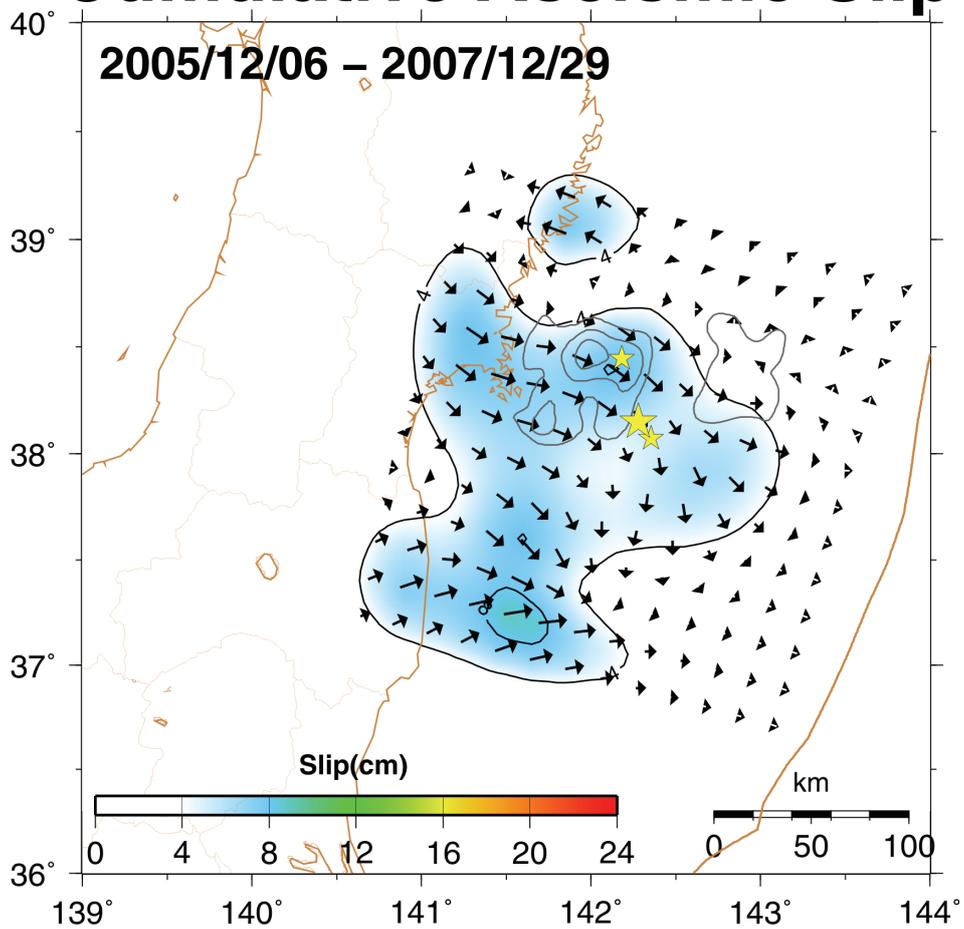


図13 陸上GPS観測点で得られた変位時系列データ及び海底地殻変動観測点の変位時系列データを基にした時間依存逆解析により推定されたプレート間すべりの積算値分布。矢印の向きはすべりの方向を示し、すべりの大きさを矢印の長さおよびカラーマップにより示した。

# Surface Displacement

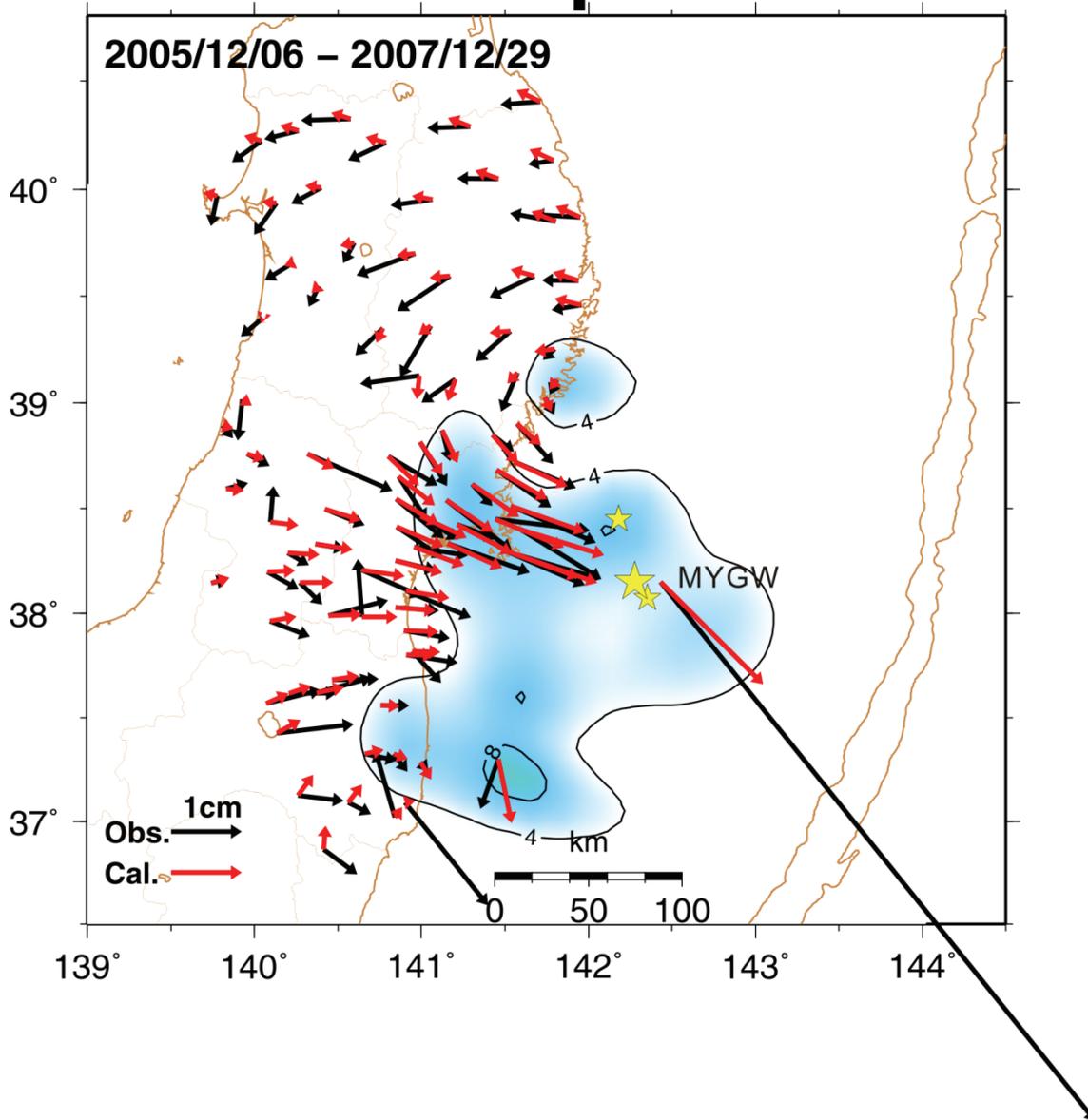


図14 陸上GPS観測点で得られた変位時系列データ及び海底地殻変動観測点における変位時系列データを基にした時間依存逆解析により推定されたプレート間すべりの積算値分布（図13のものと同じ）と、観測変位（黒矢印）と推定された余効すべり分布から計算される変位（赤矢印）との比較。

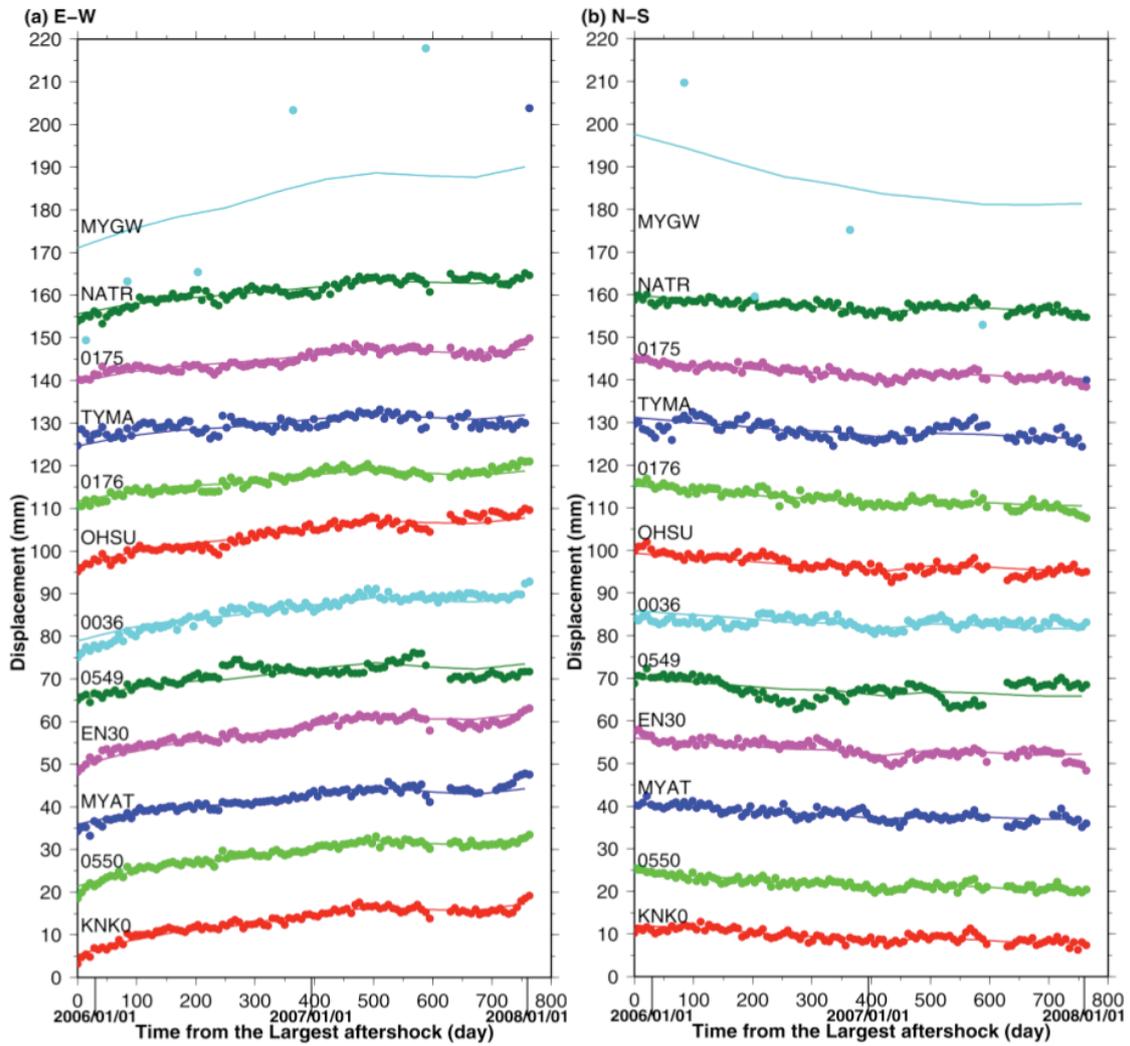


図 15 牡鹿半島周辺の GPS 観測点並びに海上保安庁海洋情報部の海底地殻変動観測点における変位時系列。上段右側に東西成分、左側に南北成分を示す。横軸は 2005 年 12 月 2 日（最大余震発生日）からの日数。各観測点での変位 (mm) を観測点ごとにオフセットを与えて示す。実線は時間依存逆解析で推定された余効すべりの時空間発展から予測される変位。各陸上観測点の位置は図 10 を参照。MYGW は海底地殻変動観測点であり、位置は図 14 中に示す。

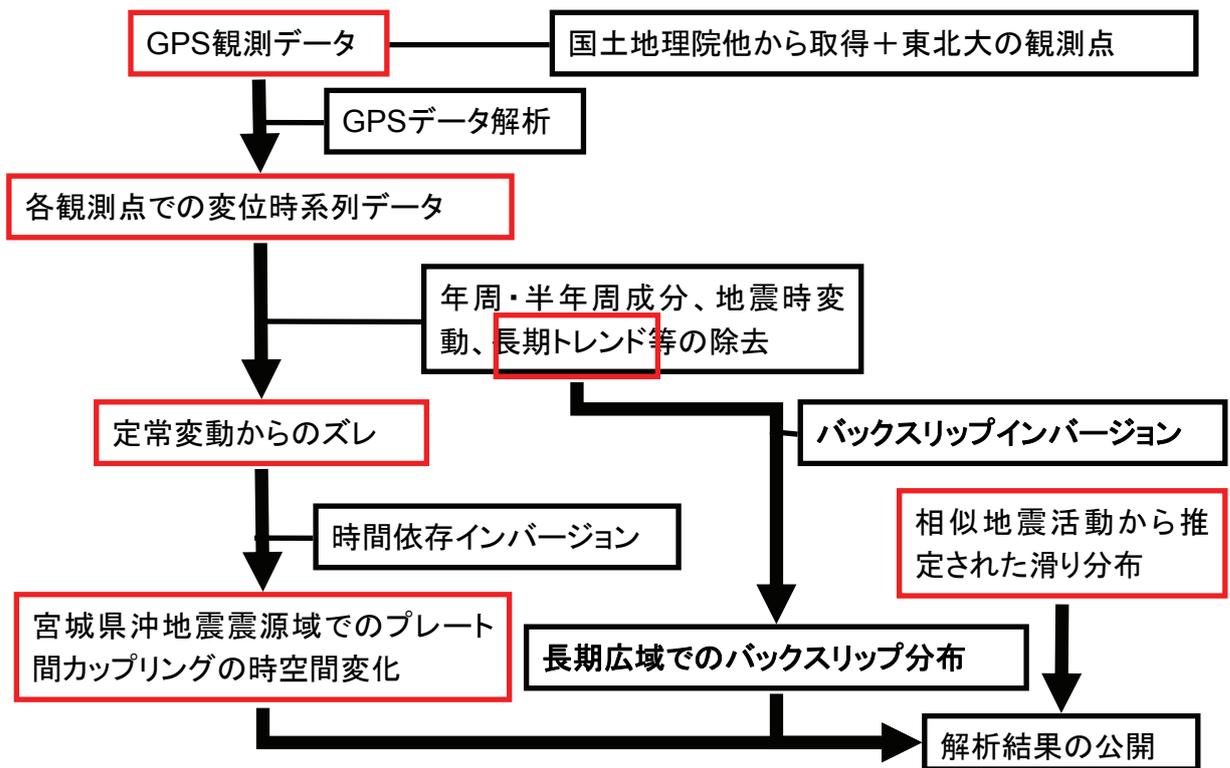


図 16 GPS データを用いたプレート間カップリングの準リアルタイムモニタリングシステムの概念図。赤枠で囲まれたものがデータ及び解析結果、黒枠で囲まれたものが処理の内容を示す。

過去五年間全体を通じてのトレンドをこの時期の定常的変位速度と考え、このトレンドと年周・半年周及びステップを取り除いた時系列を用いて時間依存逆解析を行なうことで、定常的なプレート間固着状態からのずれ、すなわちプレート間での準静的すべりの時空間発展を推定することができる。

最後に、バックスリップインバージョン及び時間依存逆解析から求めたバックスリップ及び準静的すべりの分布を描画し、Web 上にアップロードし閲覧できるようにするところまで、この自動解析システムで取り扱う。図 17 に結果表示画面のスクリーンショットを示す。

本年度までに GPS 一次データの自動解析を除く部分の構築を終了した。そこで、構築済みの部分の動作検証並びに地球物理学的に有意義な結果が得られるかの吟味を行うため、国土地理院の公表している日々の座標値 (F3 解) を用いて、過去のデータに対して本システムの解析を適用した。2005 年初めから 2005 年 8 月 16 日以前までと 2006 年から 2010 年 2 月中旬まで一週間ごと (毎月曜日) に、その日に解析を行った場合に得られる GPS データを用いて解析を行った。

図 18 に解析結果の例として、2010 年 1 月 4 日に解析を行ったとした場合に得られた結果を示す。過去五年間については、2005 年 8 月 16 日が期間内に含まれるため、それ以降のトレンドを用いての推定を行っており、2005 年の宮城県沖の地震の余効すべりが発生していた時期を多く含んでいるため、宮城県沖におけるバックスリップが小さく推定されている。過去一年間分のトレンドを用いた結果からは、宮城県沖に強い固着域 (バックスリップの大きな領域) がある一方で、福島県沖においては固着がほとんどなくなってしまう様子が見られる。2008 年 5 月の茨城県沖の地震 (M7.0) 以降、茨城県沖から宮城県沖にかけての海溝側の広い領域で、プレート間すべりが発生していたことが相似地震モニタリングから推定されており (図 3、4)、これを反映したバックスリップ分布となっていると考えられる。また、過去一月間については、推定された長期トレンドの空間的なばらつきが大きく、地球物理学的見地から有意義な推定がなされているとはいえない結果となっている。これは他の期間の解析結果でも同様であり、一年間よりも短い期間に対して有意義なバックスリップ分布のモニタリングをするためには、標準的なバックスリップ分布を過去一年間もしくは五年間のトレンドを用いた解析結果等から仮定し、その分布に近い分布が得られるような拘束を強くかけた逆解析を行う、バックスリップの方向をプレート収束方向に固定して逆解析を行なう、などの解析手法に関するさらなる工夫が必要である。

各年の最初の月曜日に解析を行ったとした場合の、過去一年間のトレンドを用いて推定したバックスリップ分布を図 19 に示す。2004 年から 2005 年までの期間を見ると、宮城県沖から福島県沖にかけての過去の地震の破壊域の周辺と、青森県沖から岩手県沖にかけての 1968 年十勝沖地震の破壊域周辺に強い固着域が存在していたことがわかる。2005 年の宮城県沖の地震の後、宮城県沖地震の震源域周辺およびその深い側のプレート境界における余効すべりのため、2006 年から 2007 年までは、余効すべりがおきていた領域でのバックスリップは弱く、その周囲の福島県沖から茨城県沖にかけての領域並びに岩手県沖において強いバックスリップが推定されている。このうち後者については、前者の弱いバックスリップ領域を空間的に滑らかに表現するために生じてしまった人

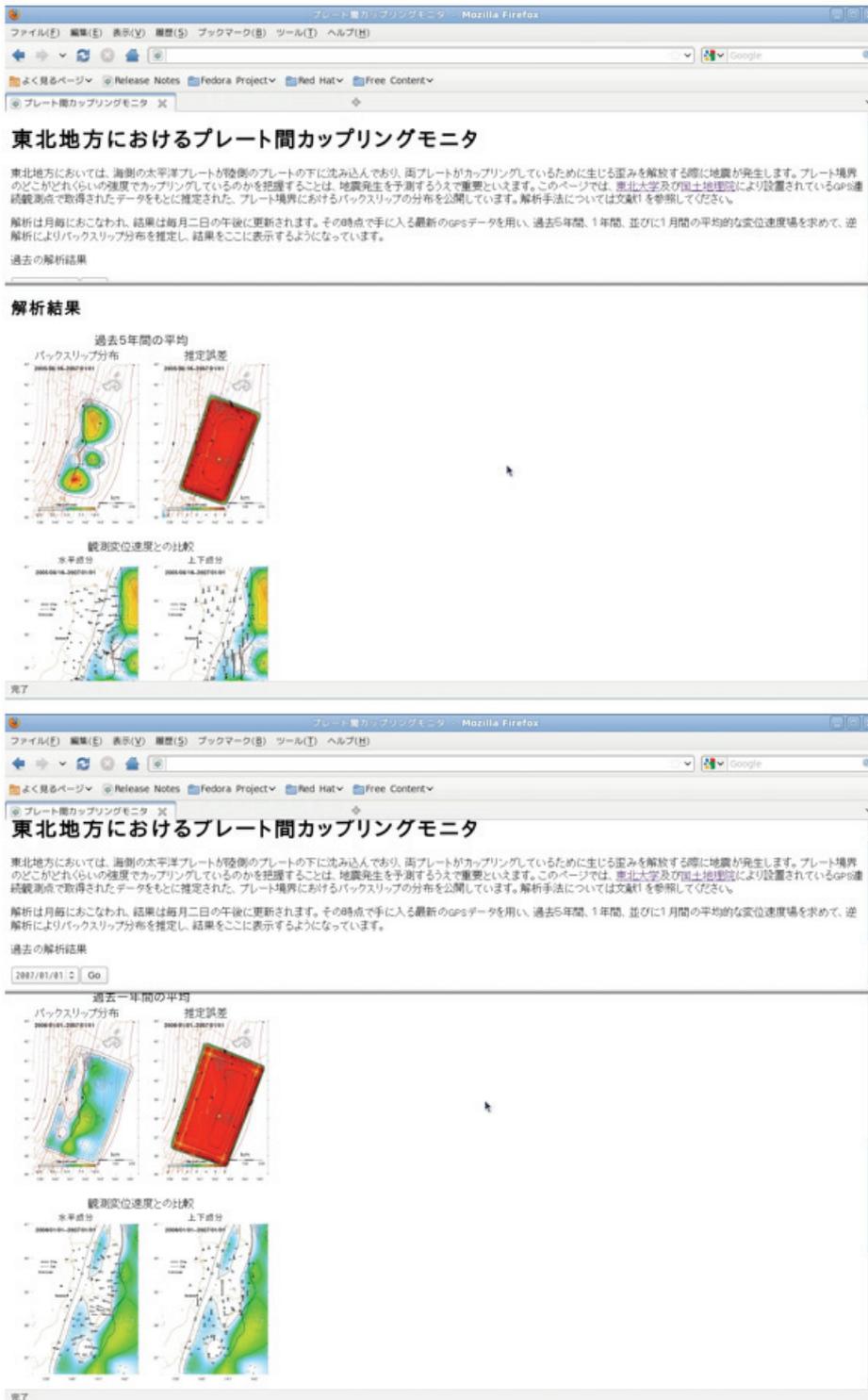


図 17 Web 上での結果閲覧画面のスクリーンショット。バックスリップインバージョンの結果について表示したものを示す。上側のフレーム内のフォームを用いて下側のフレームに表示する解析日時を変更することができる。また、各画像をクリックすることで拡大されたものを見ることができるようになっている。

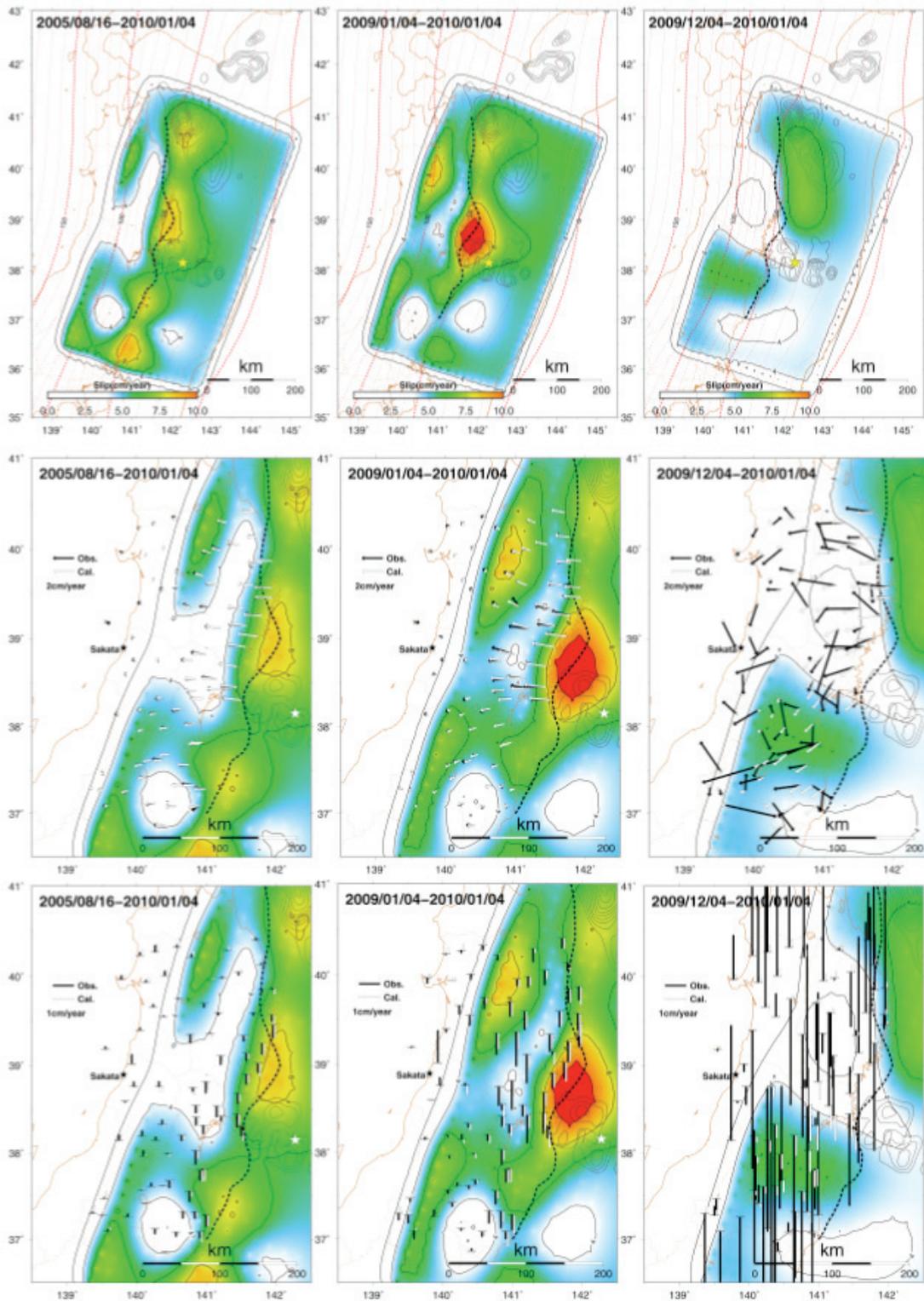


図 18 バックスリップの自動解析結果の例。2010 年 1 月 4 日に解析を行なったとした場合のもの。(上段) バックスリップの分布、(中段) 水平変位の比較、(下段) 上下変位の比較を、(左列) 過去五年間、(中列) 過去一年間、(右列) 過去一月間についてそれぞれ示す。

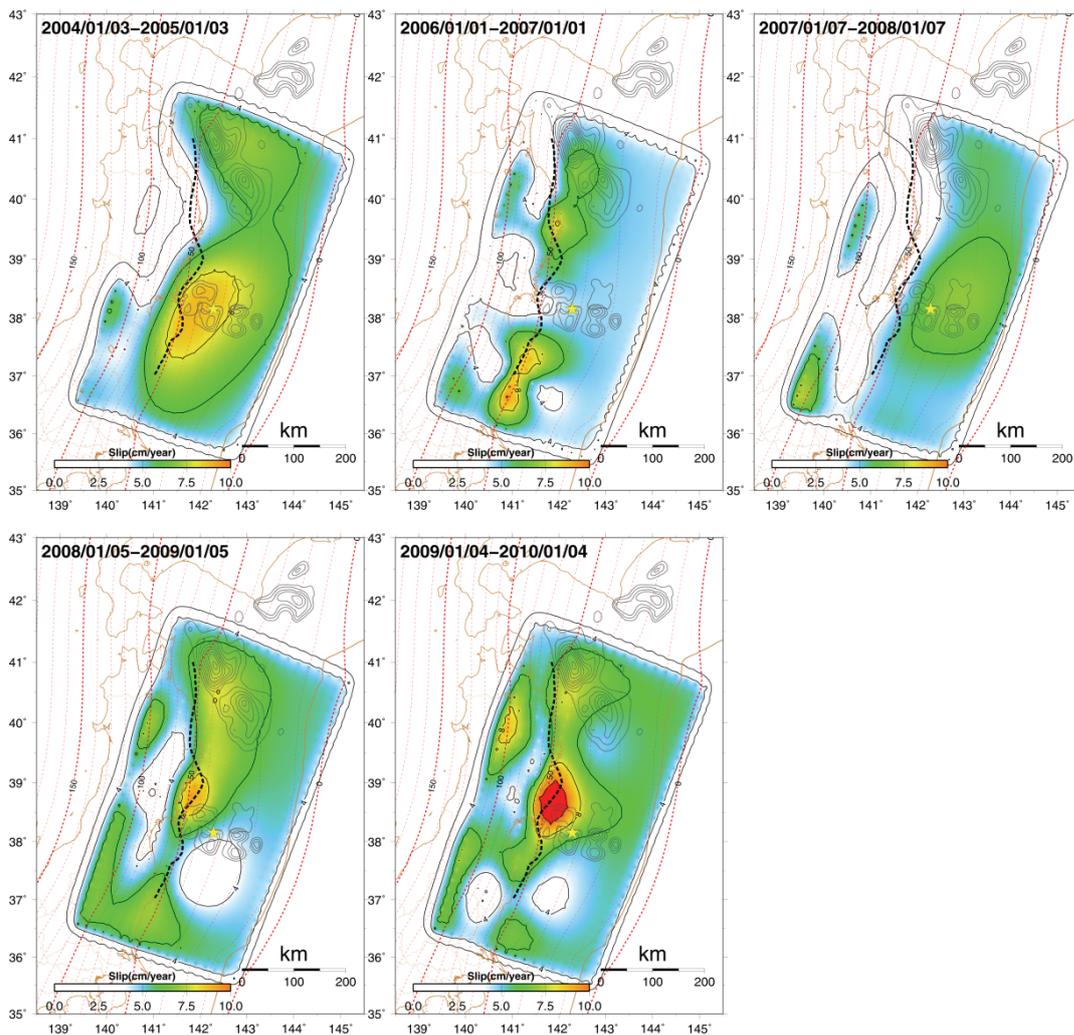


図 19 2005 年から 2010 年までのその年の最初の月曜日に解析を行なったとした際に推定されたバックスリップ分布。2005 年 1 月 4 日から 2006 年 1 月 2 日までの結果は、2005 年の宮城県沖の地震の余効すべりの影響が大きいと割愛する。(左上) 2004 年 1 月 3 日から 2005 年 1 月 3 日まで、(中央上) 2006 年 1 月 1 日から 2007 年 1 月 1 日まで、(右上) 2007 年 1 月 7 日から 2008 年 1 月 7 日まで、(左下) 2008 年 1 月 5 日から 2009 年 1 月 5 日まで、(中央下) 2009 年 1 月 4 日から 2010 年 1 月 4 日までのそれぞれの期間に対して求められたトレンドに基づいてバックスリップ分布を推定している。

為的な虚像である可能性がある。2007 年から 2008 年までの分布からは 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震の余効変動再解析の項でも扱ったように、宮城県沖のカップリングが回復してきており、バックスリップのやや大きい領域が宮城県沖を中心に推定されている。一方で、福島県沖についてはバックスリップが弱まっており、これはさらに 2008 年から 2009 年までの期間ならびに 2009 年から 2010 年までの期間において顕著となる。前述のとおり、茨城県沖から宮城県沖にいたる領域の海溝に近い側において、プレート間すべりが発生していたことが、相似地震の解析から明らかにされている。これに対応

した、バックスリップの時間的変化が推定結果に現れているものと考えられる。

相似地震解析から得られた積算すべり(図4)とバックスリップの時間変化を比較するため、図3で示されているAからFの地点に最も近いグリッドでのバックスリップの推定値を抽出しプロットしたのが図20である。過去五年間分の推定結果は、2006年以降の推定値にはすべて2005年の宮城県沖の地震の余効すべりの影響が入っており、AからFのどの点においても2005年の地震前と比してバックスリップの推定は小さくなっていることがよくわかる。また、過去一月間については、やはり有効な推定ができていないため、すべての点において時系列のばらつきが大きくなっている。

過去一年間分の推定結果に注目する。2007年末から2008年初頭において、Aを除くすべての点でバックスリップの推定値は、2005年の地震前と比してやや小さいものの、ほぼ同水準に回復している。本年度行った、宮城県沖での固着の回復を焦点とした解析の結果と概ね調和的であるといえる。また、2008年中ごろから2009年にかけて、A、Bを除くほかの領域では2005年の地震の前と比べて、バックスリップの推定値は有意に小さくなっており、相似地震解析から得られているプレート間すべりの加速と対応した現象を見ているものと考えられる。いずれの場合もAについては、他から得られている知見と整合しない結果となってしまうが、これは、この領域が陸から非常に離れているため、陸上GPS点のみを用いた推定の誤差が非常に大きくなってしまっているためと考えられる。相似地震解析から得たプレート間すべりの分布から位置情報を取り込むなどして、他のデータとの統合的逆解析を行うことで、陸から離れた領域でのバックスリップ分布の空間的な解像度並びに推定精度を向上させていくことが今後期待される。

#### 4) 宮城県沖地震震源域の地震活動と応力場推定

Yamamoto et al. (2008)<sup>3)</sup>によって推定された三次元地震波速度構造を用いて震源の再決定を行った。結果を図21に結果を示しているが、プレート境界に面的に集中するもっともらしい震源分布になった。2005年の宮城県沖の地震(M7.2)の震源域近傍(図21の断面A、B)では相似地震の発生位置とプレート境界面の両者が良く一致しており、この領域では震源決定精度が高いことが期待される。図22に2005年の宮城県沖の地震の震源域近傍の震源分布を示す。図22に示したように2005年の地震の近傍にいくつかのクラスター状の地震活動が見られる。1) 2005年の地震の破壊域内で発生し、プレート境界面に沿った活動、2) 2005年の地震の破壊域東端付近から北東-南西方向に伸びるクラスターで、プレート境界よりも浅部に位置する活動(2005年の地震発生後10日程度で活動は終息)である。

震源決定後にP波初動極性とS/P振幅比を用いて2005年の地震近傍の地震のメカニズム解を決定し、応力テンソルインバージョンを行った結果を図23に示す。最大主応力軸はプレート運動の相対運動方向かつほぼ水平方向を向き、最小主応力軸はほぼ鉛直方向を向いている。したがって、推定された応力場は宮城県沖においてプレート境界型地震の発生が期待される応力場であり、宮城県沖における広域(平均)応力場と考えられる。推定された応力場から期待されるすべり方向と発生した地震のすべり方向のずれ(残差)の分布図と頻度分布図を図24、25に示した。2005年の地震の破壊域東端で発

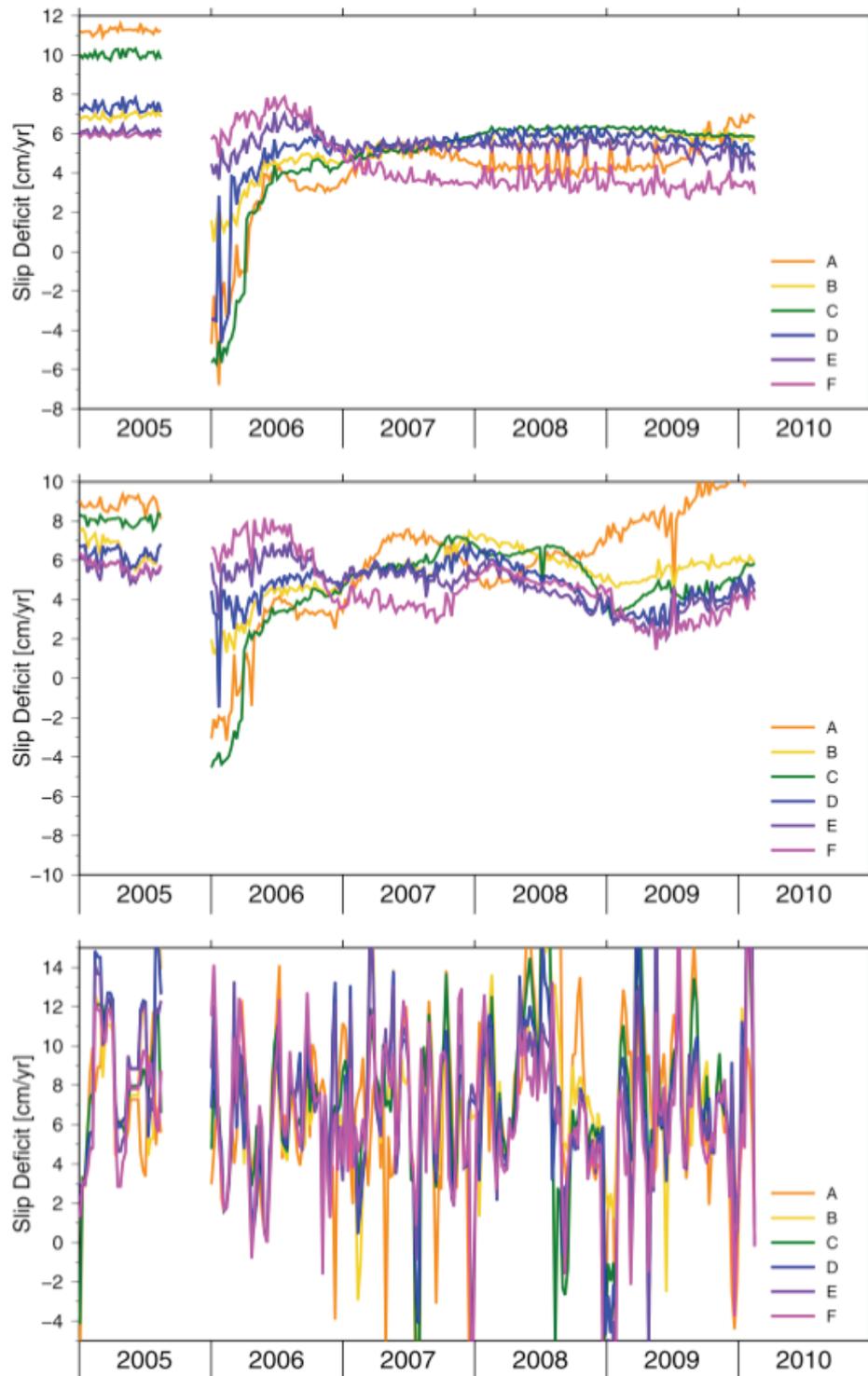


図 20 図 3 に示された A から F までの地点直近傍のグリッドにおけるバックスリップ (すべり欠損) 推定値の時間変化。正に大きいほど固着が強いことを示す。解析を行ったとする日からの過去五年間 (上段)、過去一年間 (中段)、過去一月間 (下段) のトレンドに基づいた推定値を、解析を行ったとする日の値としてプロットしている。

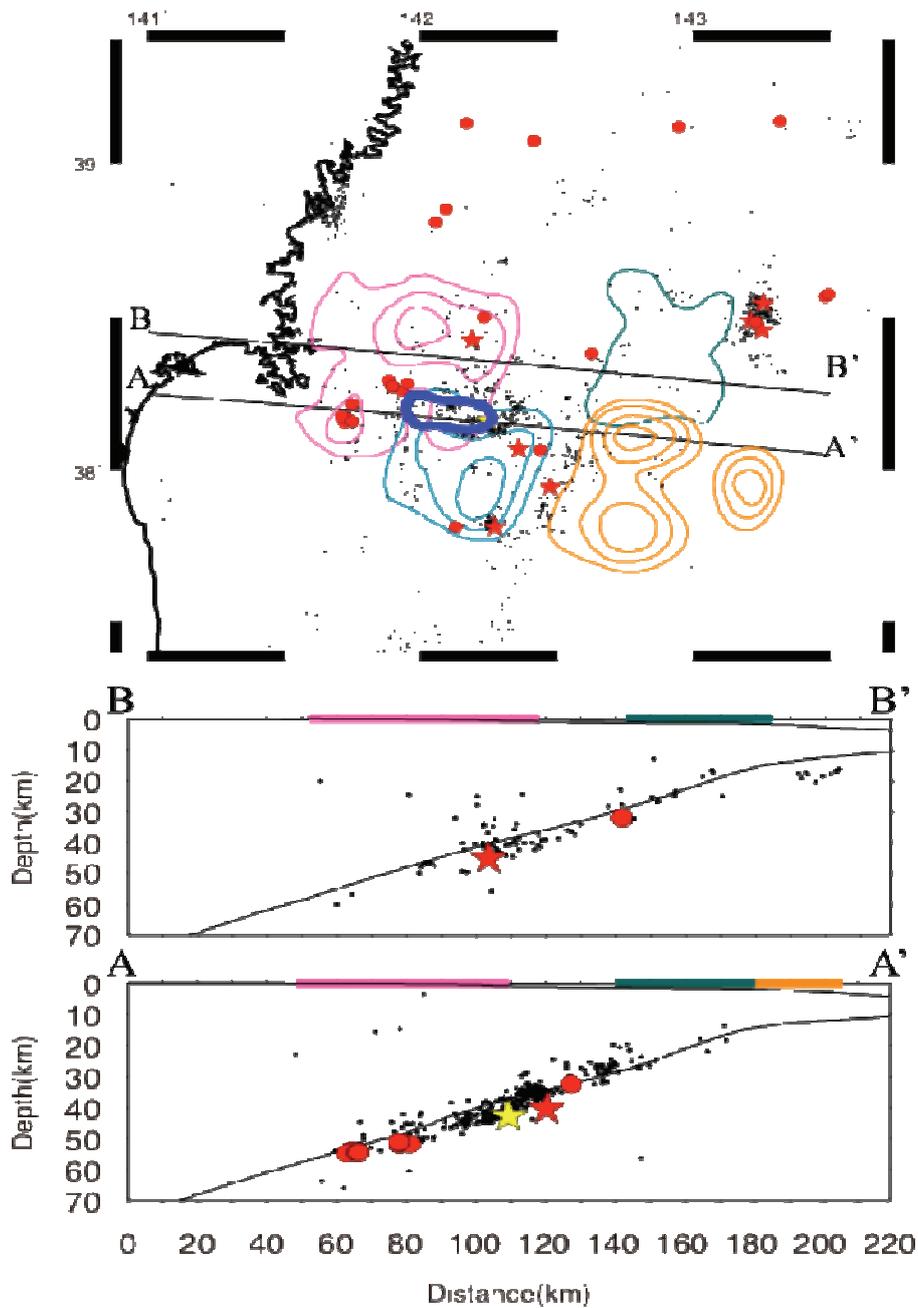


図 21 2005 年 8 月 16 日 (2005 年宮城県沖の地震の発生日) から 2007 年 10 月までの震源分布図。(上) 震央分布図。(中、下) 震央分布図中の直線 A-A'、B-B' で示された断面の震源分布図。直線 A-A' と B-B' から 10 km 以内の地震についての結果を示す。赤の丸は相似地震、赤の星は M5.5 以上のプレート境界型地震、黄色の星は 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震、それぞれの震央および震源を示す。カラーコンターは、山中 (2003)<sup>15)</sup>、Yamanaka and Kikuchi (2004)<sup>6)</sup>、柳沼 (2006)<sup>16)</sup> による宮城県沖で発生した大地震のすべり域を示す。

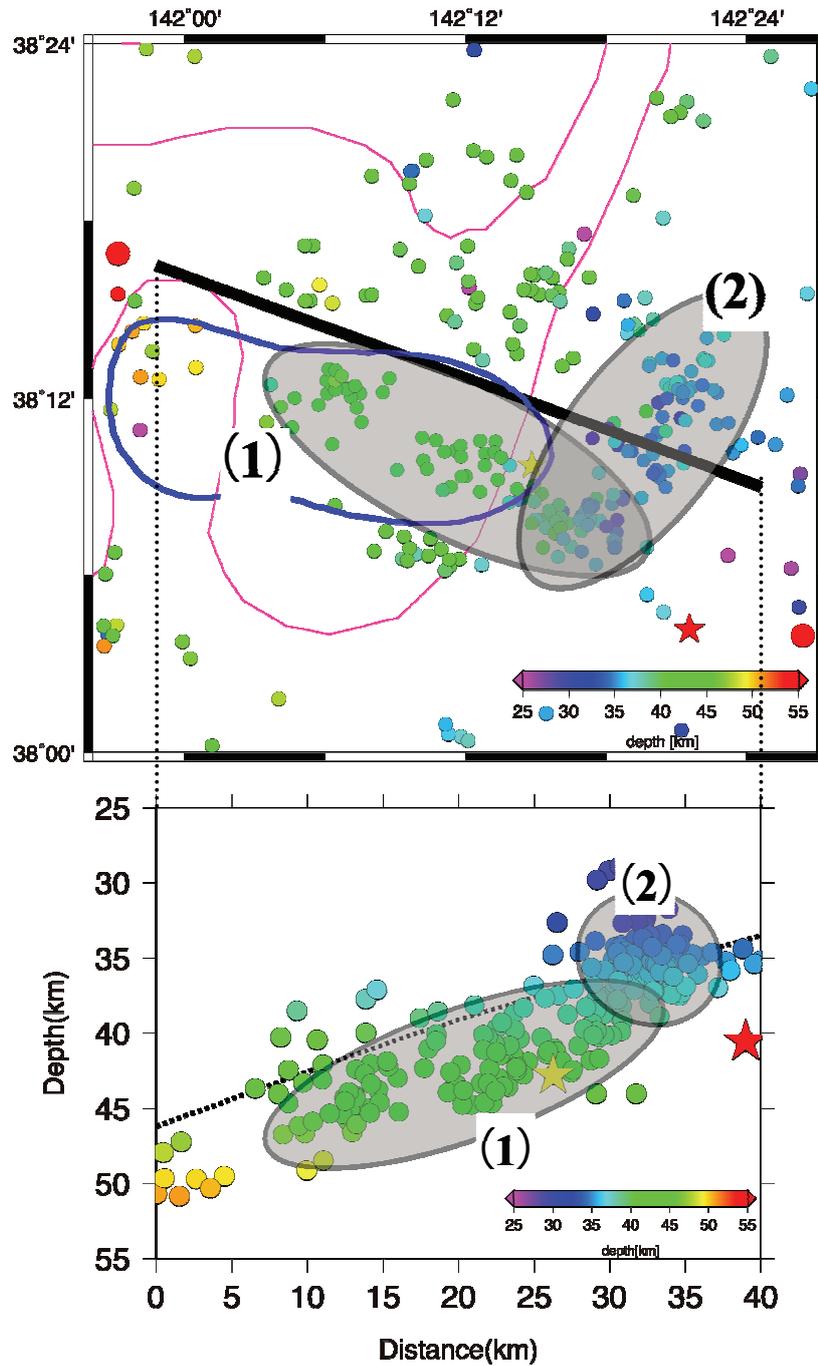


図 22 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震震源域近傍の震源分布。震源深さを図中のカラー  
 スケールで示す。(1)、(2)の線で囲われた地震については本文参照。(上) 震央分布図。  
 桃色の線は 1978 年の宮城県沖地震のアスペリティ (Yamanaka and Kikuchi, 2004)<sup>6)</sup>、青色  
 の線は 2005 年の地震の破壊域を示す (柳沼, 2006)<sup>16)</sup>。(下) 震央分布図中の直線で示され  
 た断面の震源分布図。直線から 10km 以内で発生した地震のみを示す。Yamamoto et al.  
 (2008)<sup>3)</sup>によって推定されたプレート境界を破線で示す。

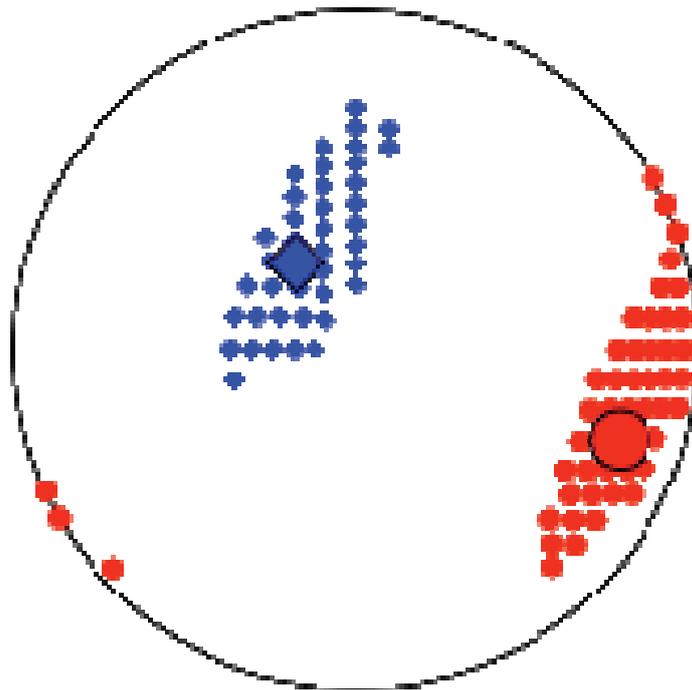


図 23 応力テンソルインババージョン (Ito et al., 2009) <sup>4)</sup>によって推定された本震震源域近傍の応力場。下半球投影で示す。赤丸と青の菱形はそれぞれ最大主応力軸 ( $\sigma_1$ ) と最小主応力軸 ( $\sigma_3$ ) を表す。

生じた地震は、他の地震に比べて残差が大きくなる傾向が見て取れる。これは、2005年の地震の破壊域東端の地震は平均的な応力場のみでは説明できず、2005年の地震の地震時すべりに起因した応力擾乱に関与した地震であることを示唆する。

2005年の地震の地震時すべりが破壊域東端の地震にどの程度影響を与えたかを見るために2005年の地震の地震時すべりによるクーロン破壊応力関数の変化 ( $\Delta CFF$ ) の計算を行った。破壊域東端の地震に注目し、それらの地震に対して計算された  $\Delta CFF$  の分布図と頻度分布図を図 26、27 に示す。多くの地震は  $\Delta CFF$  が正となる断層面において発生しており、破壊域東端の地震は2005年の地震の地震すべりに起因した応力擾乱に関連した地震であることが示された。

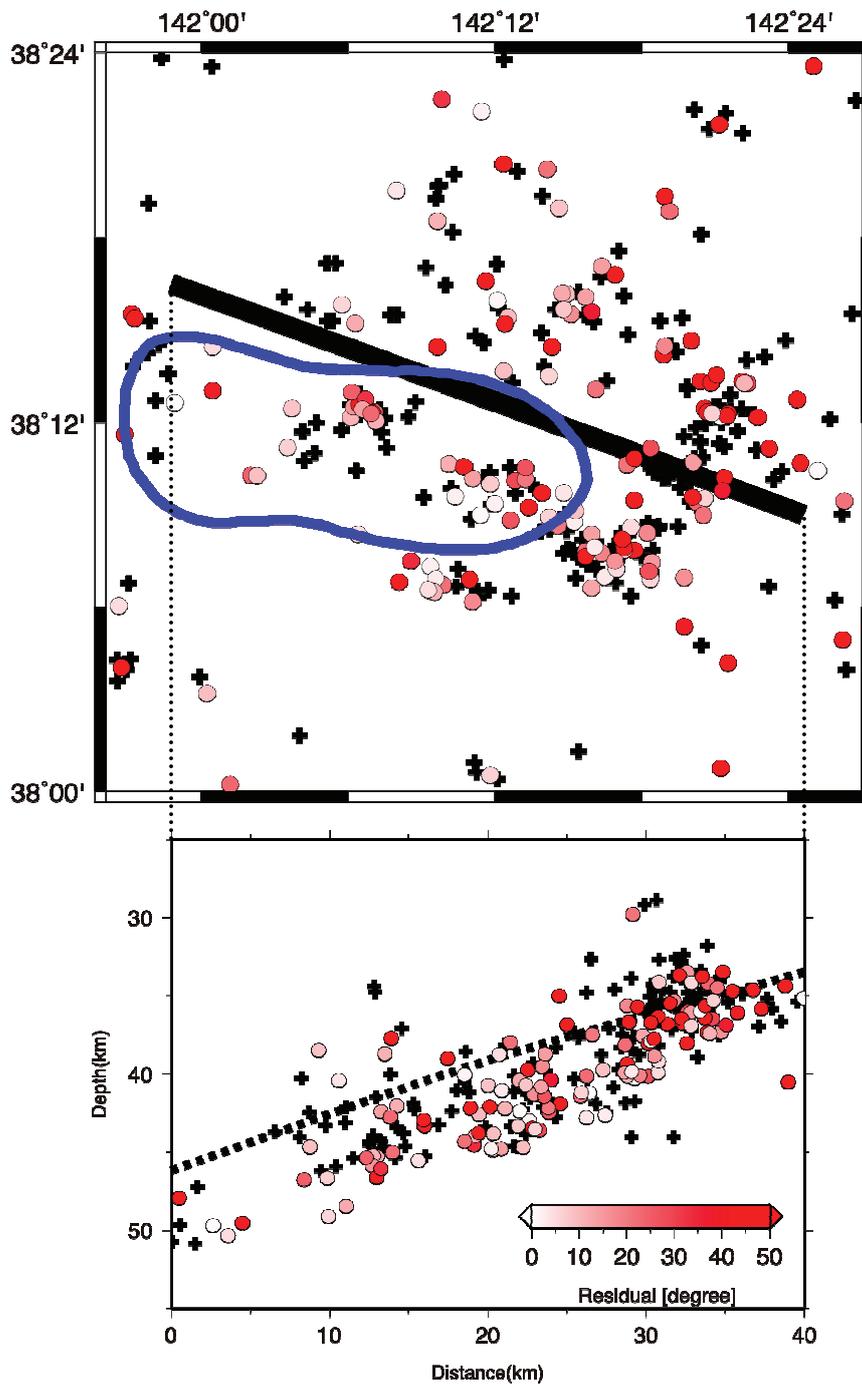


図 24 2005 年宮城県沖の地震震源域周辺の残差分布。宮城県沖の平均的応力場から期待されるすべり方向と発生した地震のすべり方向の残差をカラースケールで示す。上) 震央分布図。(下) 震央分布図中の直線で示された断面の震源分布図。

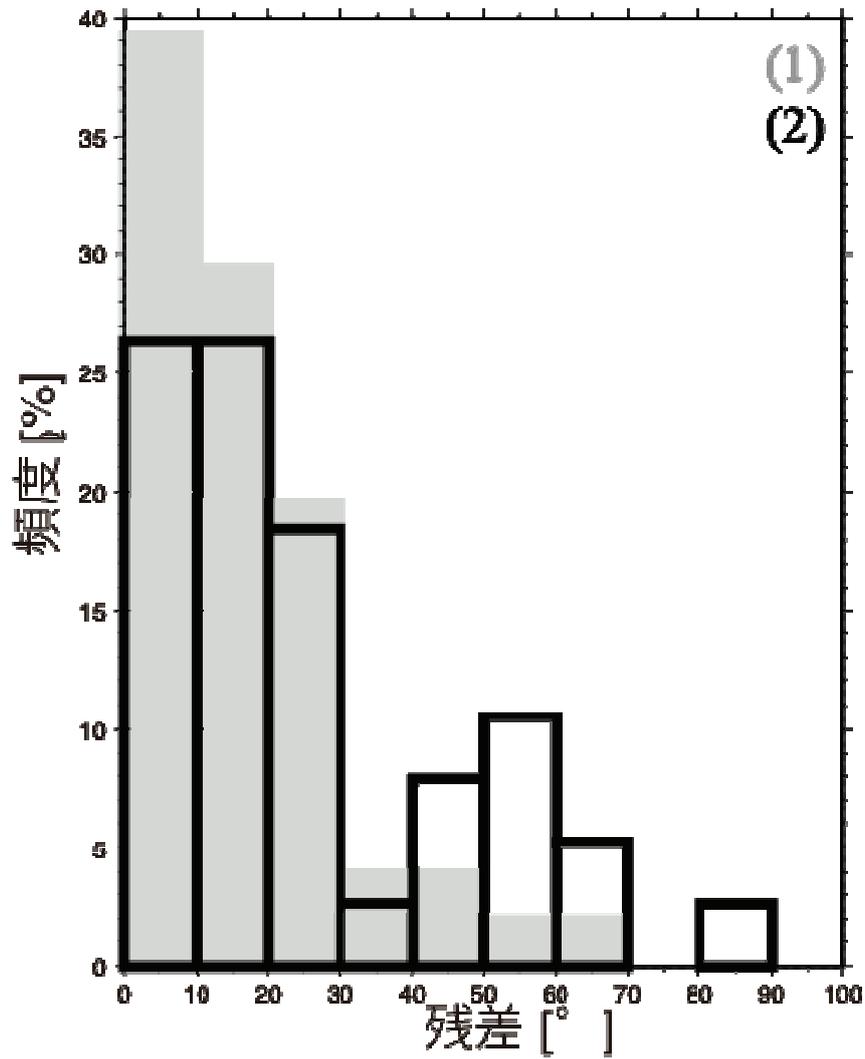


図 25 2005 年宮城県沖の地震震源域近傍の残差の頻度分布図。図 22 中の (1)、(2) の地震活動の残差を灰色、白抜き of 頻度分布でそれぞれ示す。

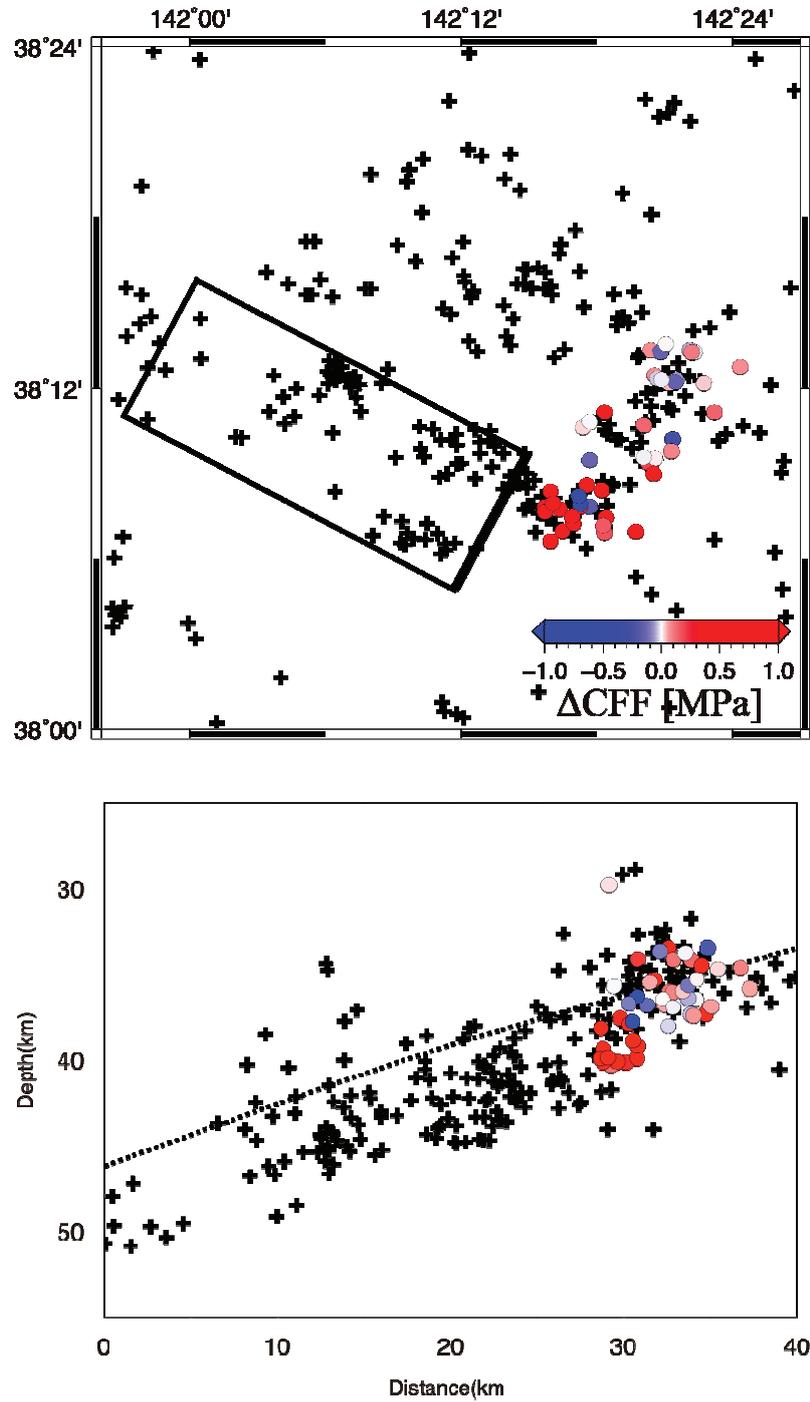


図 26 2005 年宮城県沖の地震震源域周辺の  $\Delta CFF$  分布。図 22 で示した (2) の地震活動に対して計算された  $\Delta CFF$  をカラースケールで示す。平面図中の矩形は  $\Delta CFF$  を計算する際に仮定した本震断層を示す。

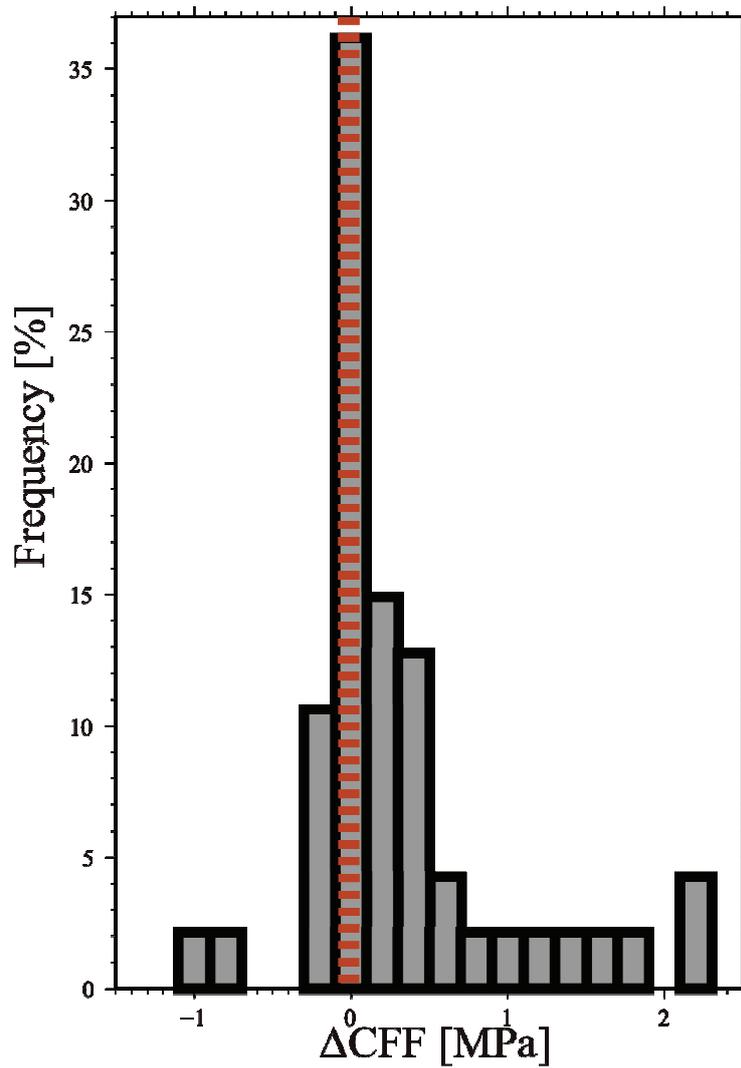


図 27 2005 年宮城県沖の地震震源域周辺の  $\Delta CFF$  の頻度分布図。図 22 で示した(2)の地震活動に対して計算された  $\Delta CFF$  の頻度分布図を示す。

#### 5) 宮城県沖地震震源域における海底地殻上下変動検知の試み

海水準位換算で 1 cm 以下の分解能を有する高性能圧力計を用いた、連続海底圧力観測を実施し、平成 20 年 11 月から平成 21 年 2 月末までの 4 ヶ月間の圧力変化を記録することに成功した。観測は、文部科学省受託研究「東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調査観測・研究」と連携して実施した（図 28）。宮城県沖海域に同時期に設置した海底圧力計のデータとともに解析することにより、地殻変動起源の海底圧力変動の検知を試みた。

海底で観測される圧力変動には、地殻上下変動による変動の他、潮汐をはじめとする様々な要因による海洋変動の寄与が含まれる。潮汐変化は、その周期が正確に知られているため、フィルタにより簡単に除去できる。一方、海洋変動のうち大気との相互作用による海水の運動による海底圧力変化は、「東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調査観測・研究」で開発中の全球海洋変動数値モデル化の手法により除去した。それでも除去しきれない変動は、観測地点の近傍の局所的な海洋変動によるものである可能性が高く、これは、隣接する観測点間で共通な変動となって観測される可能性が高い。図 29 は、こうした考え方に基づいて、2 観測点での圧力観測値の差を時系列で示したものである。差をとる前の時系列からは潮汐成分は除去してある。数値モデリングによる海洋変動成分については、それを除去したデータと除去しなかったデータを使って、それぞれの差分データの時系列を図示した。差分をとることにより、海洋変動に起因する変動成分を低減し、数 hPa（1hPa の圧力変化が海水準 1cm にほぼ相当）程度の圧力変動を検知できるようになった。海洋変動の予測値を除いたデータから求めた差分時系列の方が、ノイズと考えられる定常的な圧力変動の振幅がわずかに小さくなる傾向がみられる。海溝軸に近い観測点（JT1-JT2）では地殻変動である可能性のあるステップ状の圧力変化がとらえられているが、本業務で海底圧力計を設置した P05 の観測点においては明瞭な変動を捉えることはできなかった。

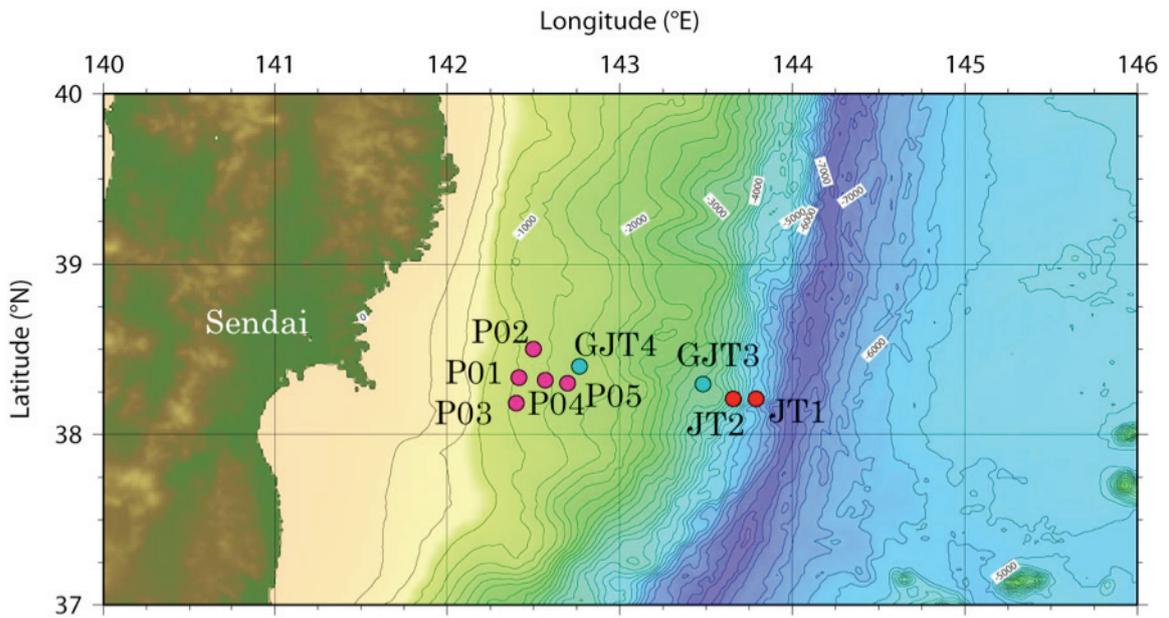


図 28 宮城県沖に設置された海底水圧計。P05 が本業務によって設置された観測点。P01～P04 は「東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調査観測・研究」事業による観測点。それ以外は、東北大が独自に展開した観測点。

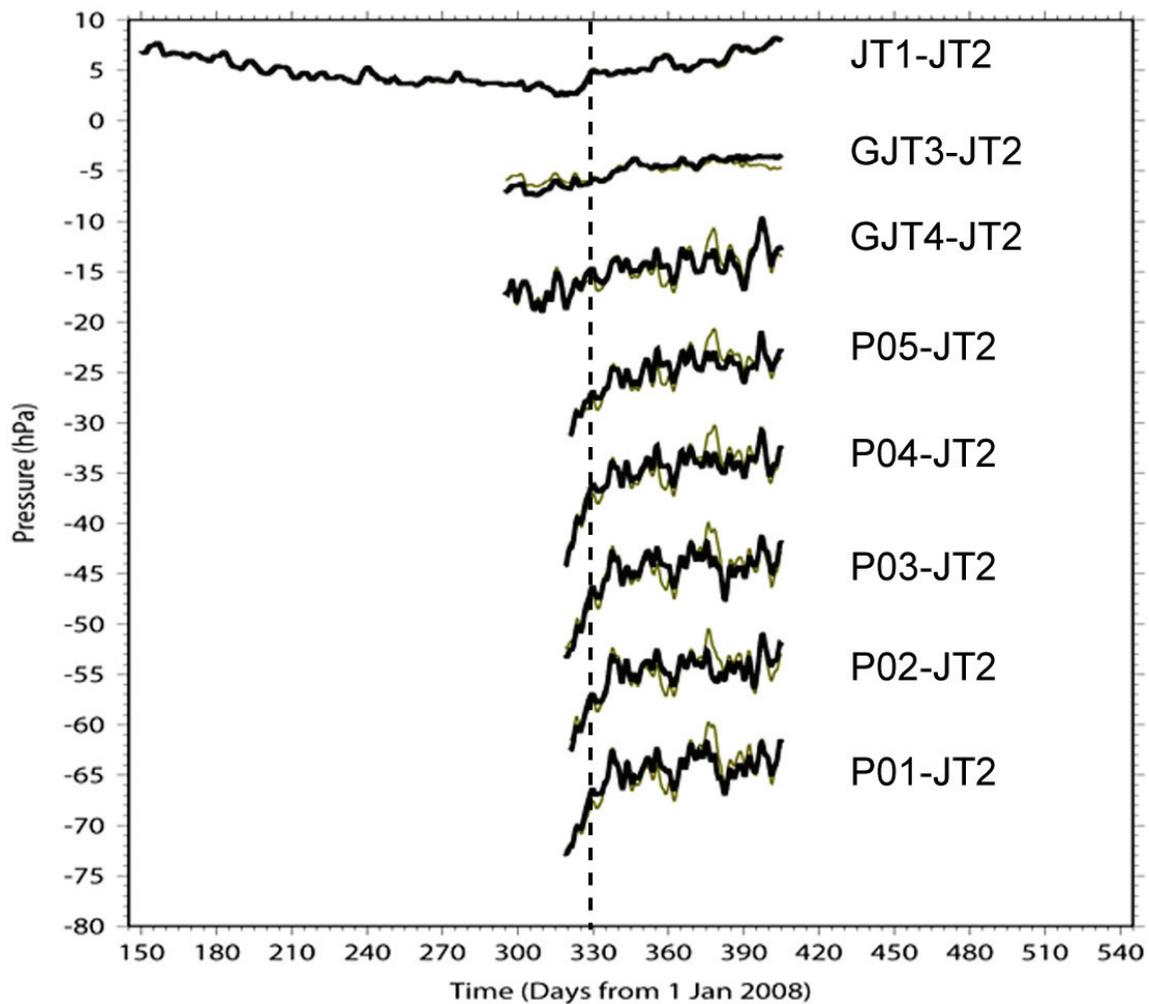


図 29 宮城県沖で得られた海底圧力データをもちいて作成した、差圧時系列データ。基準点を JT2 として、それ以外の観測点のデータと JT2 のデータとの差を求めた。黒線は、潮汐除去後、数値モデル予測値を差し引いたあとのデータ（圧力残差）を使って求めた差圧データ、灰色線は、潮汐除去したデータの差から求めたもの。いずれも、線形トレンド成分を差し引いてある。点線は、JT1-JT2 間の圧力差時系列に見られるステップ的変動の終了時。

(d) 結論ならびに今後の課題

本年度は、GPS 並びに相似地震データからのプレート間すべりの準リアルタイムモニタリングを実現するための手法の改良やデータ処理に取り組んだ。GPS データからプレート境界におけるすべりを推定するための逆解析手法の改良を行い、これまでに開発したものと同時に、実際に入手可能になるデータに対して、ルーチンの適用するための解析システムの構築を行った。構築された自動解析システムによる処理を過去の GEONET データに対して適用し、東北日本広域のプレート間カップリングの時空間発展を推定した。また、相似地震モニタリングを継続し、宮城県沖周辺における準静的すべりの時空間発展を得た。

2005 年の宮城県沖の地震以降のプレート境界における準静的すべりの推移ならびにプレート間カップリングの時空間変化をそれぞれ独立に求めたものではあるが、互いに比較し、より現実に即した知見を得ることができるようになった。今後の課題は、これらを組み合わせた解析を行うことにより、相似地震・GPS 双方からプレート間のカップリング並びにすべりの時空間変化を統合的に推定することである。

また、2005 年の宮城県沖の地震の余効すべり及び余震活動についての解析、考察を行った。余効すべりは海底地殻変動観測の結果から示唆されているように、2007 年の早い時期に完全に終息し、プレート間のカップリングが回復していることが分かった。地震活動及び応力場の推定により、2005 年の宮城県沖の地震の本震破壊域東端ではプレート境界面外において応力擾乱に起因して余震活動が発生していることを明らかにした。今後は、応力場の空間変化のより詳細なモニタとともに、時間変化のモニタが宮城県沖地震の発生機構の理解及び評価に重要となる。また、地震活動・応力場を GPS・相似地震から推定されるプレート間すべりと比較することが必要となる。

(e) 引用文献

- 1) Nadeau, R. M. and L. R. Johnson, Seismological studies at Parkfield VI: moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 88, 790-814, 1998.
- 2) Iinuma, T., Discussion on the rank deficiency of the representation matrix of the smoothing constraint in inversion methods using a Bayesian information criterion. *J. Geod. Soc. Japan*, 55, 345-353, 2009.
- 3) Yamamoto, Y., R. Hino, K. Suzuki, Y. Ito, T. Yamada, M. Shinohara, T. Kanazawa, G. Aoki, M. Tanaka, K. Uehira, G. Fujie, Y. Kaneda, T. Takanami, and T. Sato, Spatial heterogeneity of the mantle wedge structure and interplate coupling in the NE Japan forearc region. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L23304, doi:10.1029/2008GL036100, 2008.
- 4) Ito, Y., Y. Asano, and K. Obara, Very-low-frequency earthquakes indicate a transpressional stress regime in the Nankai accretionary prism, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L20309, doi:10.1029/2009GL039332, 2009.
- 5) Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves, *Earth Planets Space* 55, e21-e24, 2003.

- 6) Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, 109, B07307, doi:10.1029/2003JB002683, 2004.
- 7) Igarashi, T., T. Matsuzawa, N. Umino, and A. Hasegawa, Spatial distribution of focal mechanisms for interplate and intraplate earthquake associated with the subducting Pacific plate beneath the northeastern Japan arc: a triple-planed deep seismic zone, *J. Geophys. Res.*, 106, 2177-2191, 2001
- 8) Uchida, N., A. Hasegawa, T. Matsuzawa, and T. Igarashi, Pre- and post-seismic slip on the plate boundary off Sanriku, NE Japan associated with three interplate earthquakes as estimated from small repeating earthquake data, *Tectonophysics*, 385, 1-15, 2004.
- 9) Matsuzawa, T., N. Uchida, T. Igarashi, T. Okada, and A. Hasegawa, Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northern Honshu, Japan, *Earth Planets Space*, 56, 803-811, 2004.
- 10) Miura, S., T. Iinuma, S. Yui, N. Uchida, T. Sato, K. Tachibana and A. Hasegawa, Co- and post-seismic slip associated with the 2005 Miyagi-oki earthquake (M7.2) as inferred from GPS data, *Earth Planets Space*, 58, 1567-1572, 2006.
- 11) 佐藤まりこ・斎藤宏彰・浅倉宜矢・笹原昇・松本良浩・藤田雅之・矢吹哲一朗・望月将志・浅田昭, 船底トランスデューサによる航走海底地殻変動観測. 日本地球惑星科学連合2009年大会, J173-014, 2009
- 12) Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. Jefferson, M. Watkins and F. H. Webb, Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, 102, 5005-5017, 1997.
- 13) Yagi, Y. and M. Kikuchi, Partitioning between seismogenic and aseismic slip as highlighted from slow slip events in Hyuga-nada, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1087, doi:10.1029/2002GL015664, 2003.
- 14) Yabuki, T. and M. Matsu'ura, Geodetic data inversion using a Bayesian information criterion for spatial distribution of fault slip. *Geophys. J. Int.*, 109, 363-375, 1992.
- 15) 山中佳子, EIC 地震学ノート, No. 141, [http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo\\_Note/EIC\\_News/031031.html](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/EIC_News/031031.html), 2003.
- 16) 柳沼直, 2006, 宮城県沖地震の地震時すべりの空間分布に関する研究, 東北大学修士論文, 91pp.

## (f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
山本揚二郎, 日野亮太, 篠原雅尚, 藤江剛, 三浦誠一, 小平秀一	宮城県沖地震震源域の地震波速度構造とプレート境界深度	日本地球惑星科学連合 2009 年大会	平成 21 年 5 月 16 日
飯沼卓史, 太田雄策, 大園真子, 三浦哲, 岡田知己, 吉田圭佑, 海野徳仁, 長谷川昭	稠密 GPS 観測に基づく 2008 年岩手・宮城内陸地震の余効変動解析	日本地球惑星科学連合 2009 年大会	平成 21 年 5 月 17 日
飯沼卓史, 三浦哲, 内田直希, 海野徳仁	GPS データから推定された東北地方のプレート間カップリングの時空間変化(2)	日本地球惑星科学連合 2009 年大会	平成 21 年 5 月 18 日
東龍介, 日野亮太, 伊藤喜宏, 高波鐵夫, 三浦亮, 一條和宏, 望月公廣, 五十嵐俊博, 植平賢司, 佐藤利典, 篠原雅尚, 金沢敏彦	人工地震波探査で推定した沈み込む太平洋プレートの P 波・S 波速度構造	日本地球惑星科学連合 2009 年大会	平成 21 年 5 月 19 日
三浦哲, 飯沼卓史, 太田雄策	測地データによる 1978 年・2005 年宮城県沖地震の比較	日本地球惑星科学連合 2009 年大会	平成 21 年 5 月 19 日
鈴木健介, 日野亮太, 伊藤喜宏, 金沢敏彦, 山田知朗, 篠原雅尚, 植平賢司, 田中昌之, 山本揚二郎, 金田義行	海底地震観測による宮城県沖地震震源域周囲の応力場の推定	日本地球惑星科学連合 2009 年大会	平成 21 年 5 月 20 日
東龍介, 日野亮太, 伊藤喜宏, 鈴木健介	中部東北日本前弧下に沈み込む太平洋スラブの地震波速度構造	日本地震学会 2009 年秋季大会	平成 21 年 10 月 21 日
山本揚二郎, 日野亮太, 篠原雅尚, 藤江剛, 三浦誠一, 小平秀一	宮城県前弧域の地震波速度構造と地震活動	日本地震学会 2009 年秋季大会	平成 21 年 10 月 21 日
伊藤喜宏, 日野亮太, 鈴木秀市, 山田知朗, 篠原雅尚, 金沢敏彦	海底地震計記録を用いた地震波干渉法による日本海溝陸側斜面下の不均質構造推定の試み	日本地震学会 2009 年秋季大会	平成 21 年 10 月 21 日
鈴木健介, 日野亮太, 伊藤喜宏, 金沢敏彦, 山田知朗, 篠原雅尚, 植平賢	2005 年宮城県沖の地震 (M7.2) による応力変化と宮城県沖の応力場の推定	日本地震学会 2009 年秋季大会	平成 21 年 10 月 21 日

司、山本揚二郎、金田義行			
飯沼卓史, 三浦哲, 松澤暢, 太田雄策, 大園真子	2005年8月16日の宮城県沖の地震(M7.2)の震源域における固着はすでに回復したのか?	日本地震学会 2009年秋季大会	平成 21 年 10 月 22 日
飯沼卓史, 三浦哲, 太田雄策, 大園真子, 松澤暢	GPS データに基づく宮城県沖におけるプレート間カップリングの時空間変化の推定	日本測地学会第 112 回講演会	平成 21 年 11 月 5 日
T. Iinuma, M. Ohzono, Y. Ohta, S. Miura	Aseismic slow slip on an inland active fault triggered by a nearby shallow event, the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake (Mw6.8)	AGU 2009 Fall meeting	平成 21 年 12 月 14 日
K. Suzuki, R. Hino, Y. Ito, T. Kanazawa, T. Yamada, M. Shinohara, K. Uehira, Y. Yamamoto, Y. Kaneda	Stress change due to the 2005 Miyagi-Oki earthquake and stress field of the Miyagi-Oki region	AGU 2009 Fall meeting	平成 21 年 12 月 18 日
内田直希, 伊藤喜宏, 太田雄策, 有吉慶介, 鈴木健介, 松澤暢	準静的滑りの時空間変化に基づく地震発生切迫度評価の研究	先行過程グループ研究集会	平成 22 年 2 月 17 日
Ohta, Y., T. Iinuma, M. Ohzono, S. Miura	Coseismic and postseismic deformation of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake deduced from geodetic data	G-COE symposium 2010: Earthquakes, Active Tectonics and Geodynamics of Island Arcs	平成 22 年 2 月 19 日
伊藤喜宏, 長田幸仁, 木戸元之, 稲津大祐, 内田直希, 日野亮太, 藤本博己, 鈴木秀市, 対馬弘晃, 東龍介, 鈴木健介, 古賀祥子, 猪井志織, 辻健, 中山典子, 芦寿一郎	海底圧力・地震観測に基づく日本海溝陸側斜面下のゆっくり地震	Blue Earth `10	平成 22 年 3 月 2 日

伊藤喜宏	ゆっくり滑りの発生機構とアスペリティとの相互作用の解明	「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」成果報告シンポジウム	平成22年3月3日
日野亮太	アスペリティの特性解明に向けた観測研究	「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」成果報告シンポジウム	平成22年3月3日
内田直希	準静的滑りの時空間変化に基づく地震発生切迫度評価の研究	「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」成果報告シンポジウム	平成22年3月3日
内田直希	スラブ内地震の発生に至る過程の解明	「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」成果報告シンポジウム	平成22年3月3日
Uchida, N., S. H. Kirby, T. Okada, R. Hino, A. Hasegawa	Supraslab earthquake clusters above the subduction plate boundary offshore Sanriku, NE Japan: Seismogenesis in a graveyard of detached seamounts?	J. Geophys. Res.	in press
T. Iinuma	Discussion on the rank deficiency of the representation matrix of the smoothing constraint in inversion methods using a Bayesian information criterion.	測地学会誌	2009
Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, Y. Yabe, N. Kato, R. Hino, A. Hasegawa	Character of slip and stress due to interaction between fault segments along the dip direction of a subduction zone	Journal of Geodynamics	2009
Ariyoshi, K., T. Hori, J. Ampuero, Y. Kaneda, T. Matsuzawa, R. Hino, A. Hasegawa	Influence of interaction between small asperities on various types of slow earthquakes in a 3-D	Gondwana Research	2009

	simulation for a subduction plate boundary		
Goltz, C., D. L. Turcotte, S. G. Abaimov, R. M. Nadeau, N. Uchida, T. Matsuzawa	Rescaled earthquake recurrence time statistics: application to microrepeaters	Geophys. J. Int.	2009
Hino, R., S. Ii, T. Iinuma, H. Fujimoto	Continuous Long-Term Seafloor Pressure Observation for Detecting Slow-Slip Interplate Events in Miyagi-Oki on the Landward Japan Trench Slope	Journal of Disaster Research	2009
Hino, R., R. Azuma, Y. Ito, Y. Yamamoto, K. Suzuki, H. Tsushima, S. Suzuki, M. Miyashita, and T. Tomori, M. Arizono, G. Tange	Insight into complex rupturing of the immature bending normal fault in the outer slope of the Japan Trench from aftershocks of the 2005 Sanriku earthquake (Mw = 7.0) located by ocean bottom seismometry	Geochem. Geophys. Geosyst.	2009
Iinuma, T., M. Ohzono, Y. Ohta, S. Miura, M. Kasahara, H. Takahashi, T. Sagiya, T. Matsushima, S. Nakao, and S. Ueki, K. Tachibana, T. Sato, H. Tsushima, K. Takatsuka, T. Yamaguchi, M. Ichiyanagi, M. Takada, K. Ozawa, M. Fukuda, Y. Asahi, M. Nakamoto, Y. Yamashita, and N. Umino	Aseismic slow slip on an inland active fault triggered by a nearby shallow event, the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake (Mw6.8)	Geophys. Res. Lett.	2009

Ito, Y., K. Obara, T. Matsuzawa, and T. Maeda	Very-low-frequency earthquakes related to small asperities on the plate boundary interface at the locked to aseismic transition	J. Geophys. Res.	2009
海野徳仁	平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震(2008年6月14日M7.2)	地震予知連絡会40年のあゆみ	2009
松澤暢	宮城県沖の地震(2005年8月16日M7.2)	地震予知連絡会40年のあゆみ	2009
松澤暢	プレート境界地震とアスペリティ・モデル	地震	2009
三品正明・立花憲司・三浦哲	孔井式歪計によって観測された福島県沖の地震に伴った余効変動	北大地物報告	2009

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

### (3) 5ヵ年の成果と課題

宮城県沖地震時に破壊すると考えられるアスペリティの固着状況やその周囲における準静的すべりの状態が時空間的にどのように変化しているかを監視するための方策を開発することを目的として、①プレート境界面の形状や境界面とその周囲における中小の地震活動の空間分布を高精度で明らかにするための長期繰り返し海底地震観測と、②GPS 観測ならびに相似地震の解析に基づくプレート間すべり量の時空間変化を準リアルタイム解析の開発を推進してきた。

2005年8月16日には、M7.2のプレート境界型地震が宮城県沖で発生したが、海陸のデータの解析を進めることにより、この地震の破壊域を詳細に明らかにするとともに、1930年代や1978年に発生した過去の宮城県沖地震の破壊域との関係を考察した。

本業務が継続した海底地震観測により、この地震は、発生前から、本震の発生、余震活動に至るまでの一連の過程が明らかにされた。この地震の発生前のおよそ10日から微小地震の活動度変化が見いだされたほか、余震活動のなかに、本震のすべりによる応力変化が

引き起こしたと考えられる、プレート内地震活動が見いだされ、こうした地震の詳細な解析に基づき、本震のすべり分布の推定を試みた。さらに、こうした地震観測のデータを用いることにより、震源域周辺の詳細な地震波速度構造の推定に成功した。宮城県沖地震の主たる破壊域は、島弧マントルの直下にあるが、マントル内でも含水化が進み地震波速度が低下している領域を避けるように破壊域が分布している、すなわちマントル構造の空間的な不均質が破壊域の広がりの規定している可能性が示された。

さらに、GPS 観測および相似地震活動の解析に基づき、この地震の発生後の余効すべりの時空間発展とその終息、さらには固着が回復する過程を解明することに成功した。この間、宮城県沖の周辺においては、内陸で大きな地震が続発したため、こうした地震が GPS 観測データに及ぼす影響を正しく見積もることを目的として、宮城県沖の海陸プレート境界のみならず、内陸の活断層におけるすべりもあわせてモデル化を進めた。また、宮城県沖海域に隣接する、茨城県沖から福島県沖の海溝付近においては平成 20～21 年にかけて、プレート間すべりが加速傾向にあったことが相似地震解析から見いだされ、東北地方南東部における GPS 観測データからもまた、こうしたすべり速度変化があったことが確認された。

最終年度の平成 21 年度には、こうしたプレート間すべり監視技術開発の一環として、海底圧力の連続観測による海底地殻の鉛直変動の検出を試みた。

以上のように、本計画により 2005 年に発生した宮城県沖地震の実像、ならびにその後の地殻活動の推移についての詳細が明らかとなった。その結果、1978 年の地震時に破壊したアスペリティの一部（北側半分にはほぼ相当）が未破壊であると推定される。しかし、この未破壊アスペリティの振る舞いを正確に予測することは、未だ困難である。未破壊アスペリティ周辺での非地震性すべりの加速は、このアスペリティへの载荷を助長するため、プレート間すべりの監視の継続はきわめて重要であると考えられる。一方で、1978 年の地震以前については非地震性すべりイベントに関する観測データが皆無であり、地震の繰り返し履歴のなかでの非地震性すべりの役割を正しく理解するためには、数値シミュレーションを援用せざるをえない。その中で、本業務によってあきらかとなった震源域近傍の地震波速度構造モデルは、シミュレーションモデルの構築に重要な制約を与えるものである。