

3. 1. 2. 短期海底地震観測・相似地震・GPS 観測

(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	長谷川昭	hasegawa@aob.geophys.tohoku.ac.jp
	助教授	松澤暢	matuzawa@aob.geophys.tohoku.ac.jp
	助教授	三浦哲	miura@aob.geophys.tohoku.ac.jp
	助教授	日野亮太	hino@aob.geophys.tohoku.ac.jp
	助教	中島淳一	nakajima@aob.geophys.tohoku.ac.jp
	助教	伊藤喜宏	ito@aob.geophys.tohoku.ac.jp
	研究員	飯沼卓史	hasegawa@aob.geophys.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	鈴木公美子	
	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辺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辺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る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る。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る。

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 19 年度業務目的

長期観測型海底地震計の回収・再設置による繰り返し連続地震観測を継続して行うとともに、気象庁と共同して、短期観測型地震計を用いた多点地震観測を実施し、従来取得されている海底地震観測データとの併合処理により、1) 宮城県沖のプレート境界およびその周辺における地震波速度構造モデルの高精度化、2) 宮城県沖で発生する小地震の詳細な震源分布と発震機構解の解明を解明する。特に、2005 年 8 月の地震(M7.2)の前後にみられた地震活動度の時間変化について、活動度を時間変化させた地震の震源位置と発震機構解を明らかにすることにより、どのような機構でそうした変化が起こったのかをモデル化を目指す。

準静的すべりの時空間発展の準リアルタイム・モニタを実現するために、GPS 観測および相似地震観測データを準リアルタイムで処理するためのシステムの開発と実用化のための改良を継続して進める。本学が宮城県内を中心とした地域で整備しつつある陸上 GPS 観測点のデータと従来の観測点および GEONET のデータとの併合解析を進め、それにより得られる地表の変位速度場を用いた逆解析を高度化し、プレート間すべり分布の時空間変化を即時的に検知できるようなシステムの開発を継続して行う。また、リアルタイム収録されている陸上観測網の地震波形データから相似地震を同定し、その位置とすべり量を高精度かつ準リアルタイムで推定するための自動処理手法の開発を継続して行い、プロトタイプ・システムの完成を目指す。

(2) 平成 19 年度の成果

(a) 業務の要約

宮城県沖においては、東京大学地震研究所および気象庁地震火山部と共同で長期繰り返し海底地震観測を平成 14 年度以来行っており、本年度もこの観測を継続して実施した。今年度は、こうした海底地震観測データを用いた 2005 年 8 月 16 日に宮城県沖で発生した M7.2 の余震活動に関する研究を継続して行った。特に P 波初動極性と陸上観測点の S/P 振幅比を用いることで、小地震の発震機構解を多数推定した。得られた発震機構解の特徴から地震をプレート境界で発生した地震（プレート境界型）とプレート境界以外（非プレート境界型）に分類した。プレート境界型の地震は、主に 2005 年の M7.2 の地震のアスペリティ近傍と余効すべり量が特に大きな領域内に集中して発生した。一方で余効すべり量の大きな領域の周辺で発生した地震の多くは、非プレート境界型の発震機構解を示すことが分かった。分類した地震と余効すべりの分布について時空間的な対応関係を調べた結果、プレート境界型地震は、主に余効すべりのすべり速度が大きい期間に発生することが分かった。また宮城県沖から福島県沖にかけて海底地震観測網と陸上地震観測網の走時データを併合

処理することにより、宮城県沖地震のアスペリティに対応したマントルウェッジ内および海洋性地殻内の地震波速度異常を見いだした。

2005年8月16日の宮城県沖の地震(M7.2)の発生後における、想定宮城県沖地震の震源域のプレート間すべりの推移をGPS連続観測データから精確に推定するに際して、他の領域でのプレート間カップリングの変化に起因する地殻変動の影響を除く必要が生じた。そこで東北地方広域のGPS観測データを解析し、2002年以降のプレート間カップリングの時空間変化を推定した。解析の結果、2006年中旬から宮城県沖のプレート境界地震発生域の深部延長において、カップリングが弱まっている、もしくは消滅していることが観察された。また、1994年三陸はるか沖地震(M7.6)の震源域における固着がほぼ回復を完了していることが示唆された。

相似地震モニタリングを、関東地方(北緯35度から36.5度)をモニタリング領域に加えて、過去のデータに遡って適用するとともに、最新のデータに基づくモニタリングを継続した。また、解析の高速化の準備として自動処理震源に基づく波形切り出しを始めた。

想定宮城県沖地震の北側のアスペリティ付近で2007年12月25日に発生した、M5.6のプレート境界地震の余効すべりに関して、GPS連続観測データ並びに相似地震の活動を基に、想定宮城県沖地震への影響を検討した。GPSデータの解析からは地震時変動以外の有意なプレート間すべりは宮城県沖には推定されず、また相似地震活動も想定宮城県沖地震の震源域では顕著な活発化はなかったことから、この地震に伴う大きな余効すべりは発生しておらず、依然、想定宮城県沖地震の北側のアスペリティは強く固着していることが示された。

(b) 業務の実施方法

平成18年度に設置した6台の長期観測型海底地震計による海底地震観測を11月まで継続して実施し、回収したデータの処理を東京大学と共同して行った。また、長期観測型海底地震計5台を4月に設置して20年5月までの予定で連続海底地震観測を実施している。また、気象庁と共同して、短期観測型海底地震計を用いた地震観測を4~10月の間実施した。この観測は、6月にいったん機材を入れ替えることにより、約6ヶ月間にわたりほぼ継続して行った。

2005年8月16日に宮城県沖において発生したM7.2の地震およびその余震を観測した海底地震計と陸上の地震観測網のデータとを併合処理することにより、地震波速度構造および発震機構解を詳細に推定した。また、2006年のGPS連続観測による地表変位速度データおよび小繰り返し地震活動を解析することにより、プレート境界面上におけるすべりの時空間的な分布について、2005年の宮城県沖地震発生後から継続して推定するとともに、地震活動度との対応関係についての詳細な検討を行った。

2002年から2006年の5年間のGPS連続観測データから、各観測点におけるアンテナ交換に伴う擬似的な変動、地震時変動及び年周・半年周変動成分を、一定期間の長期トレンドと同時に推定し、求めた長期トレンドに測地逆解析手法を適用し、プレート境界での滑り

欠損量の推定を行なった。

相似地震に関しては、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、モニタリングを遡及ならびに継続した。この処理のための解析ルーチンの開発を行なった。

上記のように推定された長期トレンドを除いた GPS 観測点の変位時系列並びに相似地震活動データを用いて、2007 年 12 月 25 日の地震後のプレート間カップリングの変化について検討した。

(c) 業務の成果

1) 繰り返し海底地震観測

図 1 に、本年度実施した海底地震観測の観測点配置を示す。今年度の観測は、観測点の配置が異なる次の 5 期に分けられる。

第一期：平成 18 年 11 月 15 日～平成 19 年 4 月 27 日

第二期：平成 19 年 4 月 27 日～6 月 21 日

第三期：平成 19 年 6 月 21 日～10 月 22 日

第四期：平成 19 年 10 月 22 日～ 11 月 20 日

第五期：平成 19 年 12 月 11 日～

第一期では、本業務で昨年 11 月に設置した長期観測型海底地震計 6 台で地震観測が行われた（図 1a）。

第二期は、気象庁と共同で行った観測期間であり、4 月に気象庁観測船「凌風丸」により 5 観測点に長期観測型海底地震計を、7 観測点に短期観測型海底地震計を設置した（図 1b）。

第三期も、気象庁の共同で行った観測期間であり、6 月に気象庁観測船「高風丸」により短期観測型 7 観測点の入れ替え作業および 4 観測点に短期観測型の設置作業を実施した。これらの観測は、11 月に「高風丸」で回収するまで観測を継続して行った（図 1c）。

第四期は、第二期で設置した長期観測型観測点 5 点による観測期間で、5 台の長期観測型地震計を独立行政法人海洋研究開発機構の「白鳳丸」により 11 月に回収した（図 1d）

第五期は、ヘリコプター（朝日航洋）を用いて 5 観測点に長期観測型地震計の設置作業を行った（図 1e）。この観測は、現在も観測を継続中である（平成 20 年 12 月回収予定）。

これらの海底地震観測のデータの処理は第四期の途中までが終了している。

2) 宮城県沖の地震活動と地震波速度構造

2005年8月16日11時46分にM7.2の地震が宮城県沖において発生した。本震の波形解析などによって推定された発震機構解は低角逆断層型であり、この地震がプレート境界で発生した地震であることを示す。この地域では、前回発生した1978年宮城県沖地震(M7.4)に至るまで、およそ40年間の再来周期をもってプレート境界型地震が繰り返し発生していることが明らかになっており、次のプレート境界型地震の発生に至る過程を明らかにすることが本業務の重要な目的の一つである。

昨年度までの調査観測の結果、2005年の地震は1978年宮城県沖地震時に破壊されたアスペリティの一部だけを破壊したものであり、主要な部分が未破壊のまま残されていると推定された(例えば、*Yaginuma et al.*, 2006; 海野・他, 2007)。従って、未破壊のアスペリティに周囲のプレート間の非地震性すべりにより、ひずみが蓄積されていく過程を解明することが、次に発生する地震の時期や規模を予測する上で、決定的に重要である。そこでGPS連続観測データと小繰り返し地震活動によるプレート間すべりのモニタリングと、および海底地震観測データに基づく余震活動の詳細な時空間分布から、未破壊域へのひずみ蓄積過程および余効すべり域の時空間発展を推定した。

2005年の地震発生(2005年8月16日)前の2005年6月から2006年6月までのデータを用いて、宮城県沖周辺の地震活動を調べた。図1に示すようにOBSは宮城県沖の水深が浅い領域に設置されていない。そのため、OBSのみでは想定宮城県沖地震の震源域の西側の観測点配置に偏りが生じる。よって、震源域に近い太平洋岸の陸上の観測点のデータを併せて用いた。

陸上の観測点は、東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センターによる微小地震観測網、独立行政法人防災科学研究所の高感度地震観測網(Hi-net)と気象庁によって整備されている観測網の太平洋沿岸部の観測点を用いた。OBSによって得られた連続波形記録に対しては、OBSの設置前および回収後に行ったOBSの内部時計とGPS時計との時刻差を用いて時刻ずれの補正を行った。海底においてはレコーダ内部の温度の変化は少ないため内部時計の水晶振動子の発振周波数の変動は小さいと考えられること、また観測期間が比較的短いことから、OBSの内部時計とGPS時計の時刻差は線形に変化すると仮定し、設置前と回収後に得られた時刻差を線形補間することによって補正を行った。時刻補正を行った連続波形記録は、波形観測支援プログラムwin(ト部・東田, 1992)のデータフォーマットに変換された後に、全OBS観測点の波形データを統合した上で1分長のファイルに切り出し、これを波形データベース化した。本研究では、OBSによるデータが得られている期間中に発生した地震のうち、気象庁一元化処理によって震源が決められているものを解析の対象とし、これらの地震についてOBSおよび陸上観測点の波形記録からP波およびS波の到達時刻とP波初動極性の読み取りを行った。

震源決定にあたっては、まずOBS観測点直下の堆積層と基盤岩との間で生じるPS変換波を用いて堆積層による走時遅れを求めて補正した上で絶対走時を用いた通常の震源決

定を行った。次にその結果を初期震源分布として、ダブルディファレンス法 (Waldhauser & Ellsworth, 2000) を用いて震源を決定した。絶対走時を用いた通常の震源決定およびダブルディファレンス法で用いた速度構造を図 2 に示す。2005 年 8 月 16 日に本震が発生した後、2005 年 8 月 24 日と 31 日に 1981 年の地震 (M7.0) のアスペリティ (濃い青のコンター) の北東端で M6.3 の地震、2005 年 12 月 2 日に本震近傍で M6.6 の最大余震、2006 年 1 月 18 日に 1936 年の地震のアスペリティの南端で M5.7 の地震といった M5.5 を超える地震が発生している (図 3)。震源分布にはいくつかのクラスターが存在する (図 4)。それらは主にプレート境界 (山本, 2007) 周辺に分布するものの、いくつかのクラスターには深さ方向に明らかなばらつきがある。たとえば、2005 年の地震のすべり域の東端付近 (図 5) では、海溝軸と平行に地震が分布し、それらの深さは、周辺の地震に比べて浅い位置で発生している。また、図 4 の d の領域では、宮城県沖全域と比較すると、明らかにプレート境界面よりも浅部で地震が発生している (図 5)。これらの結果は、2005 年宮城県沖の地震の余震は、プレート境界上だけではなく、プレート境界面外でも発生している可能性を示唆する。

発震機構解の推定には、OBS と陸上観測点の P 波初動極性データに加えて、陸上観測点の P 波と S 波の振幅比を用いた。波形記録に 1 から 4Hz バンドパスフィルターを施した後、P 波、SV 波、SH 波の最大振幅をそれぞれ、上下動成分、radial 成分、transverse 成分から求め、それらの振幅比 (SV/P、SH/P) と P 波初動極性から発震機構解を求めた。震源が決定できた地震の 2116 個のうち 22% にあたる 456 個の小・中地震について発震機構解が得られた。また、発震機構解が得られた地震について発震機構解の特徴に基づき、プレート境界型とそれ以外 (非プレート境界型地震) に分類した。具体的にはプレート境界で発生した 2005 年の地震の発震機構解と小・中地震の発震機構解について Kagan 角 (Kagan, 1991) を用いて比較することで地震をプレート境界型と非プレート境界型に分類した。

発震機構解が得られた地震の 19% (86 個) がプレート境界型、68% (310 個) が非プレート境界型に分類された。13% (60 個) については発震機構解の決定精度を考慮してどちらにも分類しなかった。

宮城県沖における発震機構解の分布を図 6 および図 7 に示す。プレート境界型の地震は主に本震周辺で発生しているのに対し、非プレート境界型の地震は様々な場所で発生している。非プレート境界型の地震は様々な場所で発生しているが、空間的に均一に分布しているのではなくいくつかの集中域が存在し、本震近傍と 2003 年の地震のアスペリティの西端付近に非プレート境界型の地震の割合が高い領域が存在する (図 8)。

本震周辺の (a) の領域では、プレート境界型、非プレート境界型の地震の両者が発生している。このクラスターは 2 つのサブクラスターから構成される；(1) 海溝に平行する北東-南西方向の線形配列をするサブクラスター (図 9 で赤破線で囲んだ領域)；(2) (1) と直交する北西-南東方向に配列するサブクラスター (図 9 で緑破線で囲んだ領域)。

そのうち、(1) 海溝軸と平行な方向のサブクラスターでは、プレート境界型の発震機構解をもつ地震の割合が低く、非プレート境界型地震が卓越して発生している。逆に、(2) 北西-南東方向のサブクラスターでは、プレート境界型地震の方が卓越している。

1981年のアスペリティの北東端の(b)の領域では、プレート境界型と非プレート境界型地震の両者が混在して発生しているが、1936年の地震のアスペリティと2003年の地震のアスペリティに挟まれた(c)や1936年の地震のアスペリティの南端(d)では、プレート境界型地震はほとんど発生せず、非プレート境界型地震が卓越している。

非プレート境界型地震がプレート境界型地震に対してどのような位置に分布をするかということは応力場を考える上で重要である。地震のタイプごとのプレート境界に対する深さの差の頻度分布を図10に示す。ただし、震源の決定精度の高い領域内についてのみ示した。プレート境界型地震は、プレート境界付近に集中して発生しており、分布のピークは鋭い。すなわち、プレート境界型地震の発生位置はプレート境界面上またはごく近傍に限定される。一方、非プレート境界型の分布のピークはプレート境界よりも浅く、裾の広い形状を示す。このことは、非プレート境界型地震がプレート境界の近傍のみならず、上盤側や下盤側のプレート内でも発生していることを示す。プレート境界型の大地震に伴う余震活動のなかに、プレート境界面から離れた場所で発生する地震が含まれ、その発震機構解の多くが本震と大きく異なることは、大地震発生に起因する局所的な応力擾乱が、それらの余震の発生に寄与する可能性を示唆する。

上述した結果は、地震時すべりの不均質な空間分布により生じる応力擾乱の位置を、プレート面外で発生する非プレート境界型地震のクラスター的な活動として検出できる可能性を示すものである。したがって、非プレート境界型地震の活動状況の時空間的な変化を調べることにより、プレート境界面上におけるすべりの空間分布、あるいはその原因となるプレート境界面上における摩擦特性の変化に関する情報を抽出できる可能性がある。

次に余効すべりの分布と発生する地震の発震機構解との対応について述べる。*Miura et al.* (2006)と飯沼・他(2007)は、GPS解析を行うことで2005年宮城県沖の地震の余効すべり域を推定した。余震活動と余効すべりの積算すべり量の比較を図11に示す。本震直後では、余効すべりの大きな領域が本震近傍に存在する。本震直後の余効すべりの大きな領域とプレート境界型地震の分布を比較すると、プレート境界型地震は本震近傍の余効すべりの大きな領域に集中して発生している。一方で、非プレート境界型地震は、本震近傍と余効すべり域の北端および東端で発生している。余効すべりは、12月2日に最大余震(M6.6)が発生した後、その伝播方向を北へ変え、すべり域の中心も本震の破壊域の北東側に移った。この時期では、本震直後とは異なり、余効すべりの大きな領域では、プレート境界型と非プレート境界型地震のどちらも発生していないが、余効すべり域の南端では非プレート境界型地震が継続して発生している。

本震発生から約 1 年の余効すべりの積算すべりと地震活動を比較すると、プレート境界型の地震は余効すべり域内に集中して発生し、余効すべり域ではプレート境界型の地震の割合が高い。一方、非プレート境界型の地震の活動が活発な領域は、本震近傍を除くと余効すべり域の端に位置するように見える。このように、宮城県沖地震の余震活動期間中に発生した地震の発震機構解の空間分布と余効すべりの空間分布の間には、プレート境界型の地震は余効すべりの大きな領域で発生し、非プレート境界型の地震は余効すべりの大きさが変化する領域で発生するという対応が見られた。

余震活動の時間変化と余効すべりの時間発展との関係について述べる。図 12(a) から (d) に、余震活動群 (a) から (d) の領域内における地震活動と余効すべりの時間発展との関係を示す。発震機構解が得られた地震に対するプレート境界型の地震の割合の時間変化 (波線) を見ると、余効すべりのすべり速度が大きい期間にプレート境界型の地震の発生割合が高い傾向がみられる。逆に、余効すべりのすべり速度が低下すると共に、プレート境界型の地震の発生割合も低下する。本震発生直後の期間では、余効すべりが発生していたと考えられる (a)、(c)、(d) の 3 領域で、いずれもプレート境界型地震の割合が高い。その後、余効すべり量の減少に伴って、プレート境界型地震の発生割合も減少するが、最大余震の震源を含む領域(c)では、最大余震発生後の余効すべりの再活発化とほぼ同期するようにプレート境界型地震の発生割合も増加している。一方、非プレート境界型の地震の活動は、余効すべりによらず顕著な活動が観測期間内に見られ、非プレート境界型の地震の活動は余効すべりの時間発展と必ずしも対応関係は見られない。

Matsuzawa et al. (2004) は、アスペリティで発生した地震の余効変動が近隣するアスペリティを破壊することで二次的な余効変動が生じ、さらに次のアスペリティを破壊するといった連鎖反応モデルを提唱した。上記のような、宮城県沖地震の余震活動期間中に見られたプレート境界型の地震は余効すべりと時空間的対応は、この連鎖反応モデルによって発生様式を解釈することができる。すなわち、非地震性すべり領域の拡大に伴って、その範囲内のプレート境界上の小アスペリティの破壊が促進され、それがプレート境界型の発震機構解を持つ余震の活発化として観測されたと考えられる。

一方、非プレート境界型の地震は、余効すべり域の端で多く発生していることとプレート境界の上盤側で発生していることから余効すべりによって直接励起された地震ではなく、余効すべりが起こることによりすべり域の端部で生じる応力擾乱によって励起された地震であると考えられる。

上述のように地震活動と余効すべりの間には時空間分布において対応関係が見られた。本震の地震時すべりと同様に、余効すべりもプレート境界上の摩擦特性の影響を受け、広域応力場に対して擾乱を与えたと考えられる。したがって、プレート境界型の地震の活動によって余効すべりの時間発展を、非プレート境界型の地震によって余効すべりの空間的広がりを監視できる可能性がある。

宮城県沖に設置された OBS のデータと陸上地震観測網によるデータを統合処理したデ

ータを用いた Double-difference トモグラフィー法 (Zhang & Thurber, 2003) により、海域下の P 波速度 (V_p) および S 波速度 (V_s) の 3 次元構造を高精度で推定した。

低 V_p 、 V_s で明瞭にイメージされる海洋性地殻は深さ 20~70km の範囲において、高 V_p/V_s を保ったまま沈み込んでいることがわかった (図 13)。この結果は、北西太平洋における人工地震探査の結果と、東北日本の陸域下でのトモグラフィ解析による結果をつなぐものであり、これらを総合すると、海洋性地殻は沈みこむ以前から高い V_p/V_s によって特徴付けられ、その特徴を保持しつつ地下深部にまで沈み込んでいることが明らかとなった。

プレート境界の位置 (山本, 2007) を基準として、上盤側のマントルウェッジおよび下盤側の海洋性地殻の内部それぞれについて、宮城県沖地震のアスペリティの分布に対応するような不均質構造についての検討を行い、次のような特徴を見出すことができた。

(1) マントルウェッジ内においては、アスペリティの周辺では高 V_p および高 V_s であり、周囲に比べ V_p/V_s は小さい (図 14)。このことは、アスペリティが分布する領域においては、マントルウェッジの水和がほとんど起こっていないことを示すものであり、ここで M7 級の地震が繰り返し発生することの原因の一つであると考えられる。(2) 海洋性地殻内においては、2005 年宮城県沖地震の震源周辺において、その周囲に比べて V_p/V_s が有意に小さい (図 15)。この領域は、1978 年宮城県沖地震の破壊過程においても破壊開始点に隣接するアスペリティとなっており、2005 年の地震と同様の破壊過程が繰り返されたと考えられている。破壊の開始点については、1936 年宮城県沖地震もこれらの地震に近いことが知られる。本研究によって見出された海洋性地殻内に見られる局所的な低 V_p/V_s 域が存在することにより、この領域は周囲に比べて応力集中を受けやすくなるために、大地震の破壊の開始点になりやすい場所となっている可能性がある。

3) GPS によるバックスリップ推定

GPS 連続観測のデータの解析から推定された、2002 年から 2006 までのプレート間カップリングの推定について報告する。昨年度報告済みであるが、2005 年宮城県沖地震の発生後にみられた余効すべりの空間分布とその時間変化には、宮城県沖地震の想定震源域付近以外のプレート境界でのカップリングの変化の影響が及んでいることが示唆されていた。そのため、東北地方におけるプレート境界でのカップリングの変化を広域の GPS データを用いて改めて推定した。

図 16 に東北地方中南部に設置された GPS の観測点の配置を示す。東北大学によって設置された GPS 観測点で取得したデータは、公衆回線とモデムを使ったダイヤルアップ式で東北大学まで伝送している。

得られた GPS 観測データの基線解析には、米国航空宇宙局 (NASA) のジェット推進研究所 (JPL) で開発された GIPSY/OASIS-II (GOA-II) による精密単独測位法 (Precise Point Positioning ; 以下、PPP 法と呼ぶ) (Zumberge *et al.*, 1997) を用いた。得られる GPS

観測点の変位の時系列には、プレート間カップリングやプレート間の準静的すべりによる地殻変動のほかに、季節変動成分や地震に伴う変動及びアンテナ交換等のサイトメンテナンスに伴う擬似的なステップ変動が含まれている。そこで、下記の(1)式で示したような、線形トレンド、年周・半年周成分、地震時変動などのステップ変化からなる関数を仮定し、最小二乗法により $a \sim g$ の各係数を推定した。

$$u(t) = a \cdot t + b + c \cdot \sin(2\pi t/T) + d \cdot \cos(2\pi t/T) + e \cdot \sin(4\pi t/T) + f \cdot \cos(4\pi t/T) + \sum_{j=1}^J g^j \cdot H(t - t_a^j) \quad (1)$$

ここで $u(t)$ は観測点座標の時系列、 T は 1 年間の日数、 $H(t)$ は階段関数、 t_a^j は j 番目の地震の発生日である。また、線形トレンド a について、2002 年から 2006 年までの全期間に対して一つの値をとるものとした場合、2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震前後で違う値になるとした場合、2002 年から 2006 年までの年ごとに異なる値とした場合、及び 2002 年から 2006 年までの年ごとに異なりかつ 2005 年は 8 月 16 日を境に値が変化するとした場合の四通り解析を行なった。図 17 に座標値時系列の例を示す。

上述の方法により得られた各期間のトレンド成分（観測点の変位速度）をデータとして、*Yabuki & Matsu'ura* (1992) のインバージョン法を用いてバックスリップ分布を推定した。推定領域の上端及び下端においてバックスリップが 0 となるという拘束条件をかけた上で、プレート収束方向から ± 45 度の範囲に解が求まるように NNLS (Non-Negative Least Square) 法を用いて解析を行なった。2002 年から 2006 年までの期間について、年毎に、また 2005 年については 8 月 16 日で期間を分けて得られたトレンド成分を用いた場合の結果を図 18 に示す。これらの図から以下のような特徴を指摘することができる。

- (1) 2005 年宮城県沖地震以前の期間においては、宮城県沖に非常に強い固着域が存在していた。
- (2) 1994 年三陸はるか沖地震の震源域においてやや強い固着域が存在している。
- (3) バックスリップの大きな（最大値の 1/2 以上）領域の西縁は低角逆断層型地震の西縁 (*Igarashi et al.*, 2001) とほぼ一致している。
- (4) 一方でそれよりも深い領域も弱く固着している。
- (5) 2003 年までの期間と、2004 年から 2005 年 8 月までの期間とでは、宮城県沖の固着域の中心位置が異なっており、やや北へ遷移したように見える。
- (6) 2004 年頃から福島県沖南部で固着がやや強化している。
- (7) 2005 年宮城県沖地震以後の期間では、1978 年の宮城県沖地震の破壊域よりも深い側の固着が消滅している。
- (8) 小繰り返し地震の活動度と、固着域の分布は概ね調和的である。

図 19 にチェッカーボードレゾリューションテストの結果を示す。左図のようにすべりが無い部分と、プレート収束方向に 3 cm/year のバックスリップに相当するすべり速度を与えた部分とを配置して、各観測点において期待される変位速度を計算し、計算された

変位速度の各成分にそれぞれ最大10%の誤差を乱数で与え、それを元に逆解析を行なった。結果を見ると、海溝付近のすべり分布はほとんど再現できていないのに対し、それ以外の領域では概ね推定できていることがわかる。なお、再現されたすべり領域は仮定されたすべり領域に対して面積が狭くなる一方、最大すべり速度は大きめに推定される傾向も見られる。全体のモーメントの総計では概ね矛盾なく説明できているものと思われるが、実際の推定結果について、すべり領域やすべり量について議論する際にはこの点に注意を要する。

図20に、M7.2の地震の発生前である2002年1月1日から2005年8月15日までの期間と、地震発生後の顕著な余効すべりが終息した後の2006年1月1日から2006年12月31日までの期間、それぞれにおけるバックスリップの分布を示す。図には一年当たりの値として示している。前者については、1997年から2001年までの5年間のデータを用いて同様の解析をおこなった *Suwa et al.* (2006) の結果と同様に、宮城県沖で強い固着の傾向を示しているのに対し、後者の期間については、地震発生後の余効すべり (*Miura et al.*, 2006) の影響により、宮城県沖の固着はかなり弱まっているように見える。一方で解析領域の北側の岩手県北部・青森県沖では、逆にバックスリップ速度の増加傾向が見られる。

上述のバックスリップ分布の特徴の(7)に関して、GPSの変位時系列に戻ってみると、2006年の後半から上下成分に非定常な変動が現れており、特に内陸の点でその変化が顕著であった。図21にいくつかの点における時系列を示す。深部での固着の変化は沿岸部よりも内陸部に影響を強く及ぼすと考えられ、これらの変位時系列は深部での固着の弱化（もしくは消滅）を強く示唆する。一方で、年周変動成分が除去し切れていないようにも見えるため、今後さらに最近のデータを加えての解析を行ない、トレンドの変化が確実なものなのかどうかを検証していく必要がある。

4) 相似地震モニタリング

相似地震は、プレート境界の非地震性すべり域に存在する小さなアスペリティが繰り返し破壊するために生じると考えられる (*Ellsworth, 1995; Nadeau et al., 1995*)。すなわち、小繰り返し地震のアスペリティでは、1)その周囲の非地震性すべりによって応力が集中し、2)やがてそれがアスペリティの強度の限界に達し、地震が発生する、というサイクルを繰り返す。このような小繰り返し地震発生メカニズムが正しく、小繰り返し地震は、その周囲の非地震性すべりに追いつくように発生すると考えると、逆に小繰り返し地震の積算すべりから、その周囲での準静的すべりの時間変化を推定することができる。

図22は、2007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。本年は昨年までにモニタリングしていた領域に関東地方（北緯35度から36.5度の範囲）を加え、過去に遡って相似地震活動の再評価を行い、プレート境界面におけるすべり速度を改めて求めた。相似地震の判定基準としては、震央間距離40km以内の過去の地震と波形を比較し、P・S波を含む40秒間で1-8Hz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。

推定された相似地震活動の時空間分布から計算された、プレート境界面上での滑り速

度分布の例を図 23 に示す。図 23(a)には 2001 年 1 月までの一年間のすべり速度が示されている。プレート境界型地震発生域の深部ですべり速度が高く、特に三陸はるか沖地震の破壊域よりも深部、岩手県から青森県の沖にかけてやや高いすべり速度を示す領域があることが分かる。この傾向は、他の期間においてもそれほど変わらない。一方、2006 年から過去一年間のデータから推定されたすべり速度では、宮城県沖地震や十勝沖地震のアスペリティ周辺ですべり速度が高まっており、それぞれ 2005 年の宮城県沖の地震 (M7.2)、2003 年十勝沖地震 (M8.0) の余効滑りの影響を見て取れる (図 23(b))。また、GPS データから得られたバックスリップ分布 (図 18、図 20) と比較すると、バックスリップの大きい領域、即ちプレート間の固着が強い領域においては、相似地震から求められたすべり速度が概ね小さくなっており、ほぼ調和的な結果を得ることとなった。

5) 2007 年 12 月 25 日の地震

2007 年 12 月 25 日に M5.6 の地震が宮城県沖で発生した。この地震は、規模は大きくなかったものの、震央が 1978 年の宮城県沖地震の震源域内であった (図 24) ため、現在もまだその大部分が固着していると考えられる 1978 年のアスペリティに何らかの影響を及ぼす可能性も考えられた。このため、地震発生前後の地殻変動並びに相似地震活動を詳細に検討した。図 25 は、宮城県牡鹿半島周辺の東北大学、および国土地理院の GPS 連続観測点における、2007 年 12 月 4 日から約 50 日間の座標値変化を示す。なお、ここで示した座標値は、2005 年 8 月の宮城県沖地震 (M7.2) 発生前の期間において推定された季節変動成分とリニアトレンド成分を差し引いたものである。これらの時系列を *Yagi & Kikuchi* (2003) のインバージョン法で解析することにより、プレート境界面上に仮定したすべり分布の時間発展の推定を行った。なお、*Yagi & Kikuchi* (2003) のインバージョン法では、座標値時系列の中に地震時地殻変動によるステップ関数的な座標値変化を複数含むような場合にも適用できるようになっており、ここではそれを利用して 2007 年 12 月 25 日の地震に伴う地震時すべりも同時推定した。

図 26 にインバージョン解析による推定結果とその時の推定誤差を示す。12 月 4 日から 12 月 18 日の期間において、逆断層型の非地震生すべりが発生しているように見えるが、これについては、季節変動の除去がうまくできていない可能性もあり、更なる検討を要する。同図の赤枠で囲んだパネルは同時推定した 12 月 25 日の地震による地震性すべりである。地震時すべりの最大値は 12.7cm と推定された。推定されたすべり分布に基づいてモーメントの積算値を計算した結果、モーメントマグニチュードは 5.7 に相当しており、地震学的に推定されたマグニチュードと概ね調和的である。元々の観測された時系列 (図 25) を見ると、ノイズレベルとほぼ同程度の座標値変化ではあるが、震源過程に関する情報がそれなりに抽出できているものと考えられる。

同地震後の相似地震活動を図 27 に示す。等値線で示されている 1978 年宮城県沖地震の破壊域、並びにその南方及び東方 (2005 年の宮城県沖地震のあと、余効すべりが到達した領域 (*Miura et al.*, 2006)) では相似地震活動の活発化は見られず、1978 年宮城県沖地震の破壊域の北側で活動があったことがわかった。これらの解析結果によれば、今回の地震に伴い大きな余効すべりが発生しており、想定宮城県沖地震の発生に強い影響をもたらした、とは考えにくい。

図 24 に示されている通り、今回の地震及び 2005 年 12 月 17 日の余震 (M6.1) と、*Yamanaka & Kikuchi* (2003) による 1978 年宮城県沖地震の破壊域の北側の大きく滑った部分とはやや重なりあう関係にあるが、*Yaginuma et al.* (2006) の推定結果を用いると、地震時に大きなすべりがあった領域の縁でこれらの地震が発生したように見える。このことは、2005 年の宮城県沖の地震以降のこの地域の諸活動について、想定宮城県沖地震に与える影響について評価する際には、1978 年宮城県沖地震の破壊域の不確定性についても考慮に入れる必要があることを示唆している。

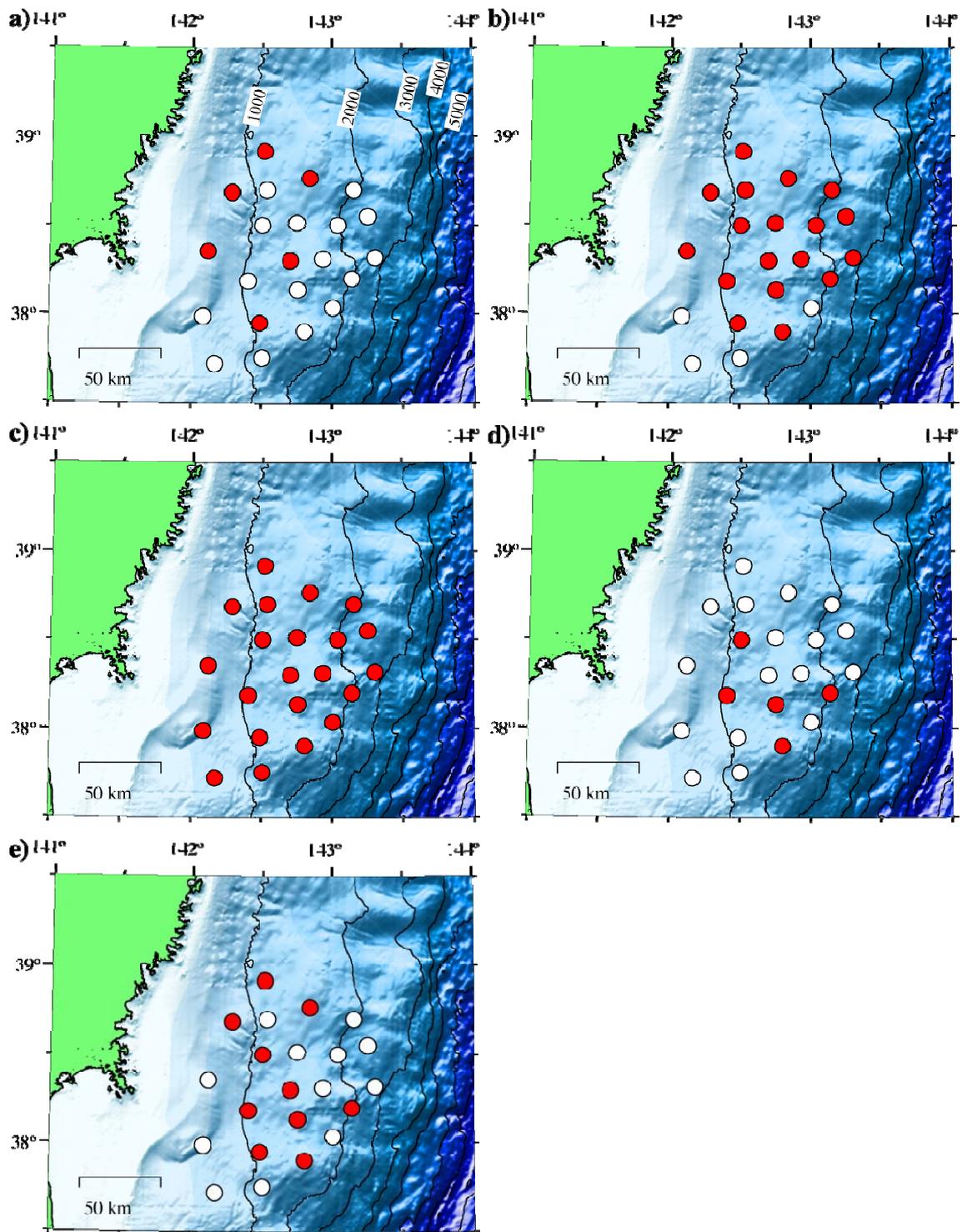


図1 平成19年度に実施した海底地震観測の観測点配置図。a) 第一期、b) 第二期、c) 第三期、d) 第四期 e) 第五期。白丸が全観測点の配置、赤丸がそれぞれの観測期間に海底地震計が設置されていた地点。

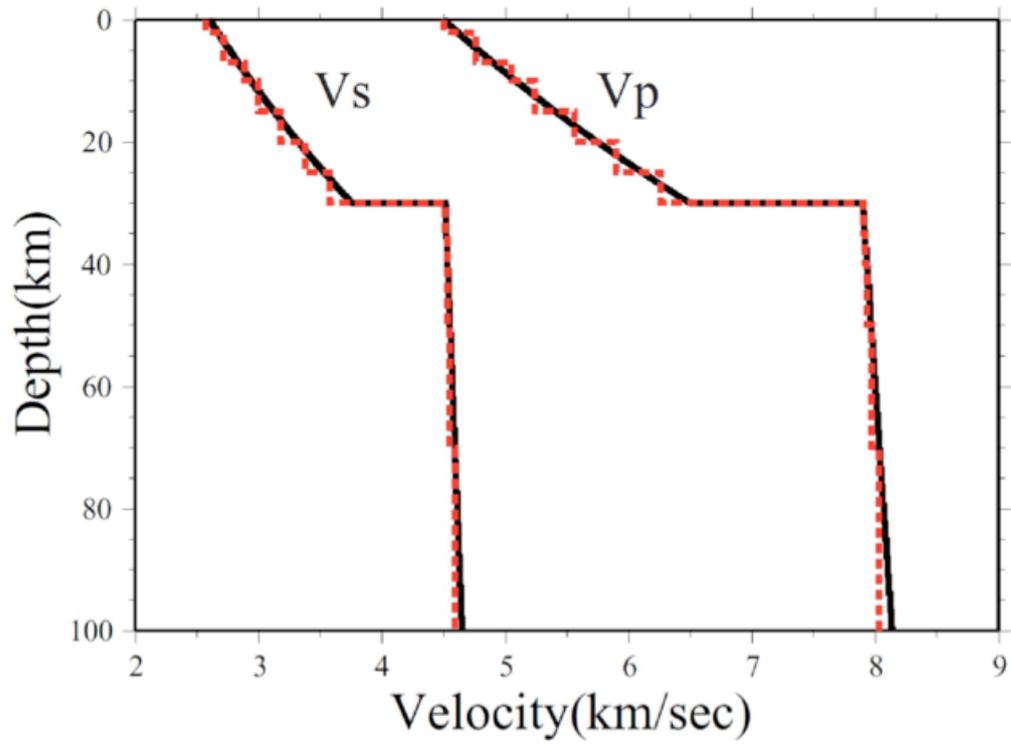


図2 震源決定に用いた1次元速度構造。実線は堆積総補正を用いた絶対走時の震源決定で用いた速度構造、破線は Double-difference 法で用いた速度構造を示す。

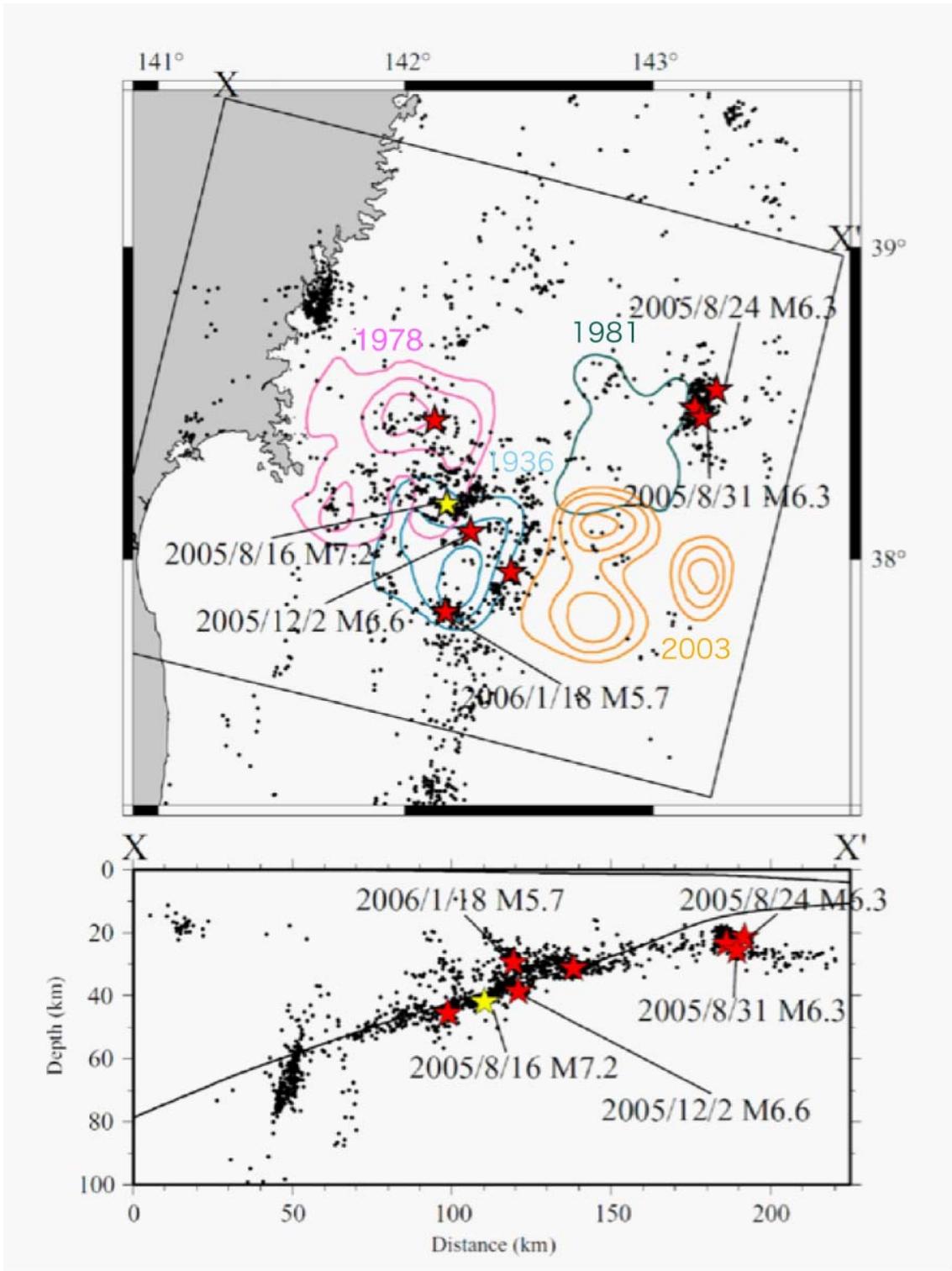


図 3 Double-Difference 法で求めた震源分布。黄星は 2005 年 8 月 16 日に発生した地震を示す。赤星は M5.5 以上の地震を示す。(上) 震央分布図。カラーコンターは山中(2003)および Yamanaka & Kikuchi (2004)によるアスペリティを示す。(下) 上図矩形領域内の鉛直断面図。実線は山本(2007)によるプレート境界を示す。

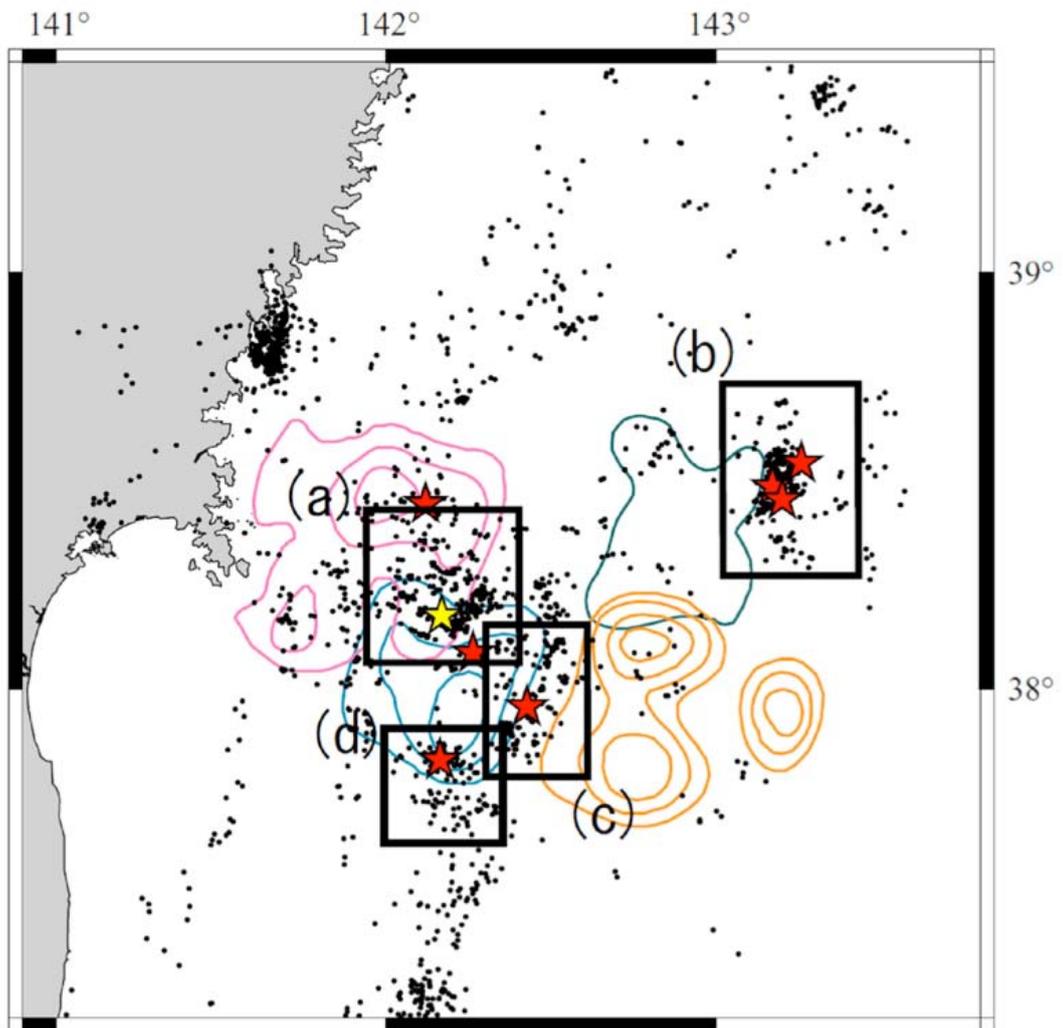


図 4 2005 年宮城沖の地震の余震における顕著なクラスターの分布。シンボルは図 3 と同様である。

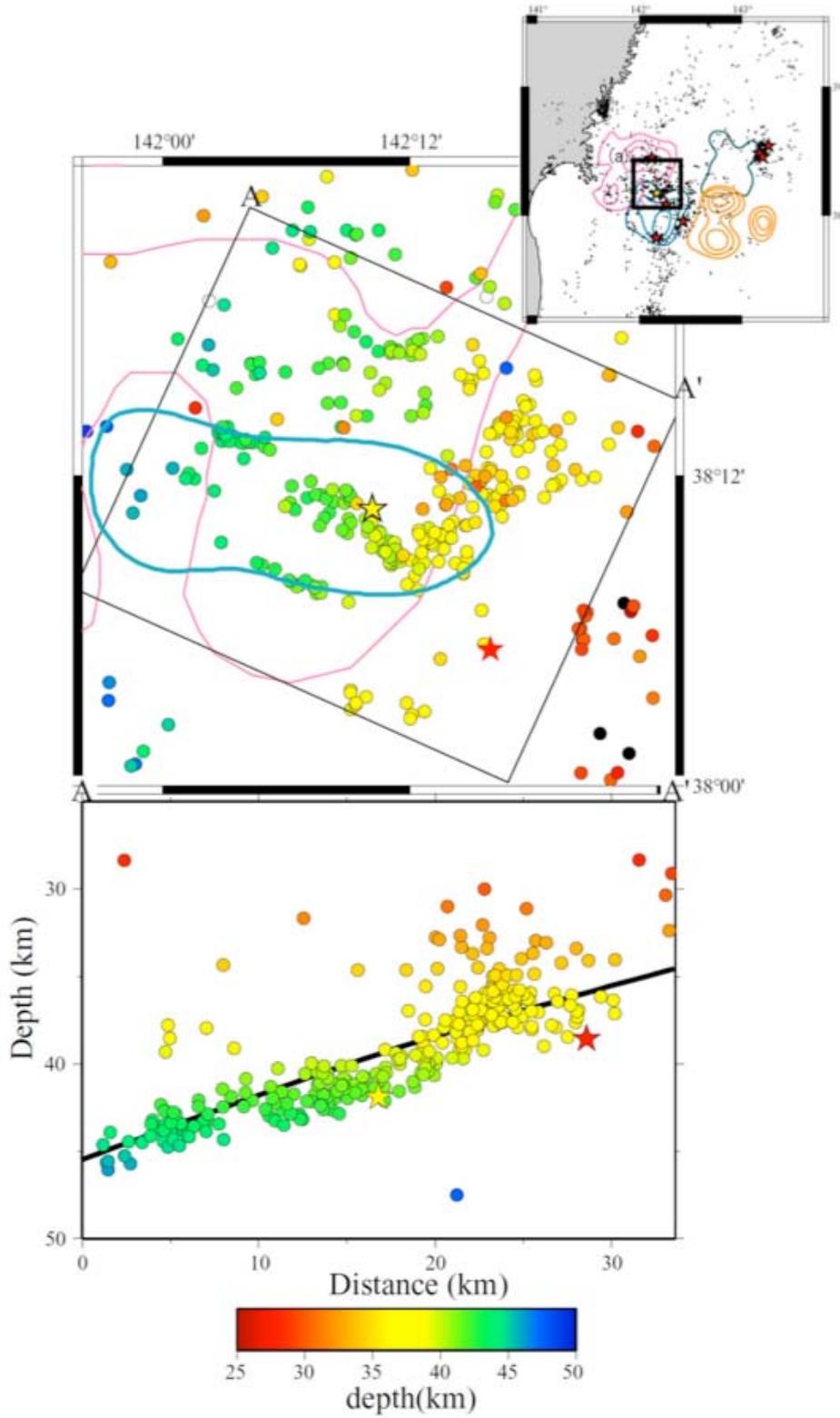


図5 図4の領域(a)の拡大図。震源(丸)のカラーは震源の深さを示す。青線は2005年8月の地震の地震時すべり(を示す)。他は図3と同様である。

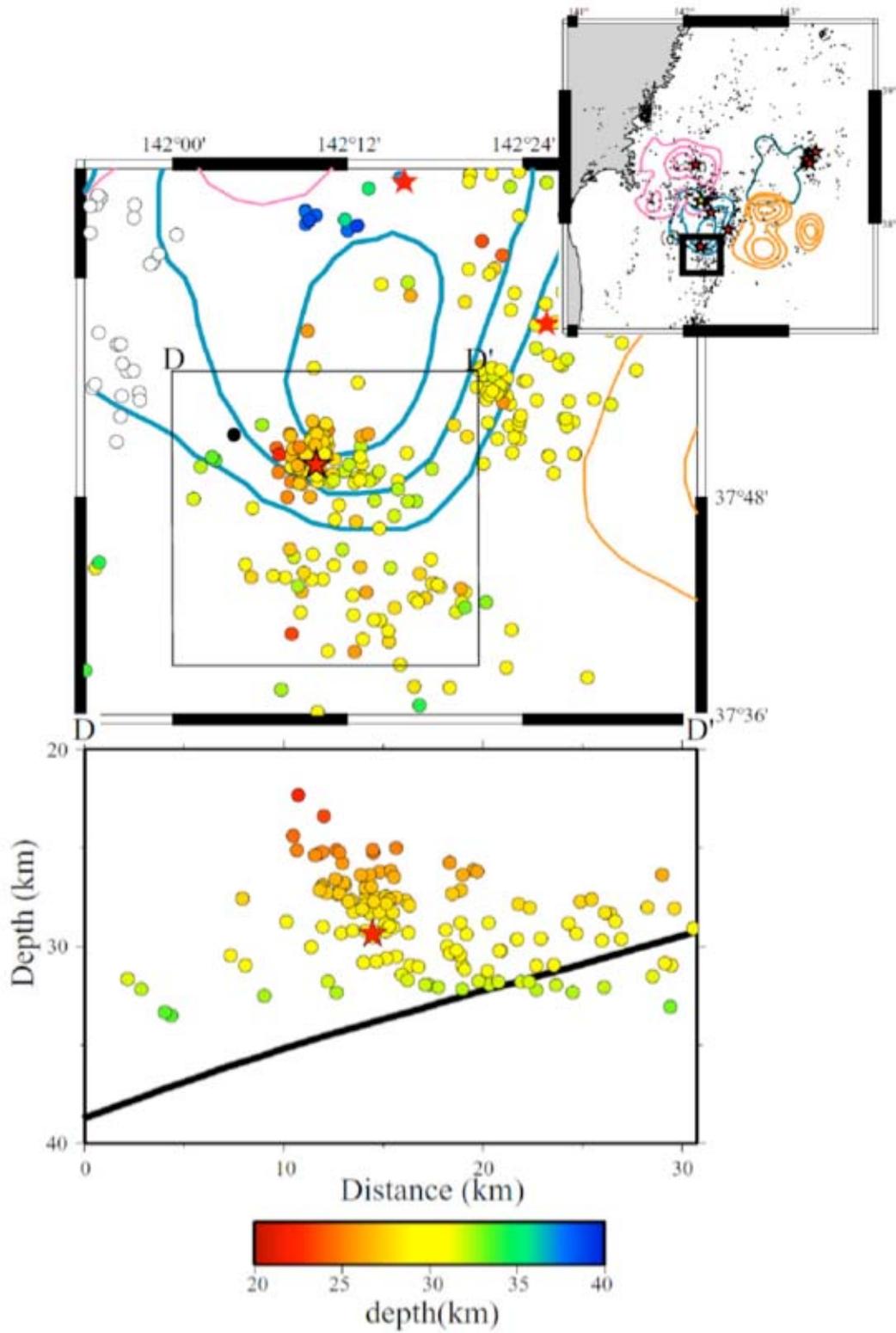


図5 図4の領域(d)の拡大図。シンボルは図3と図4と同様である。

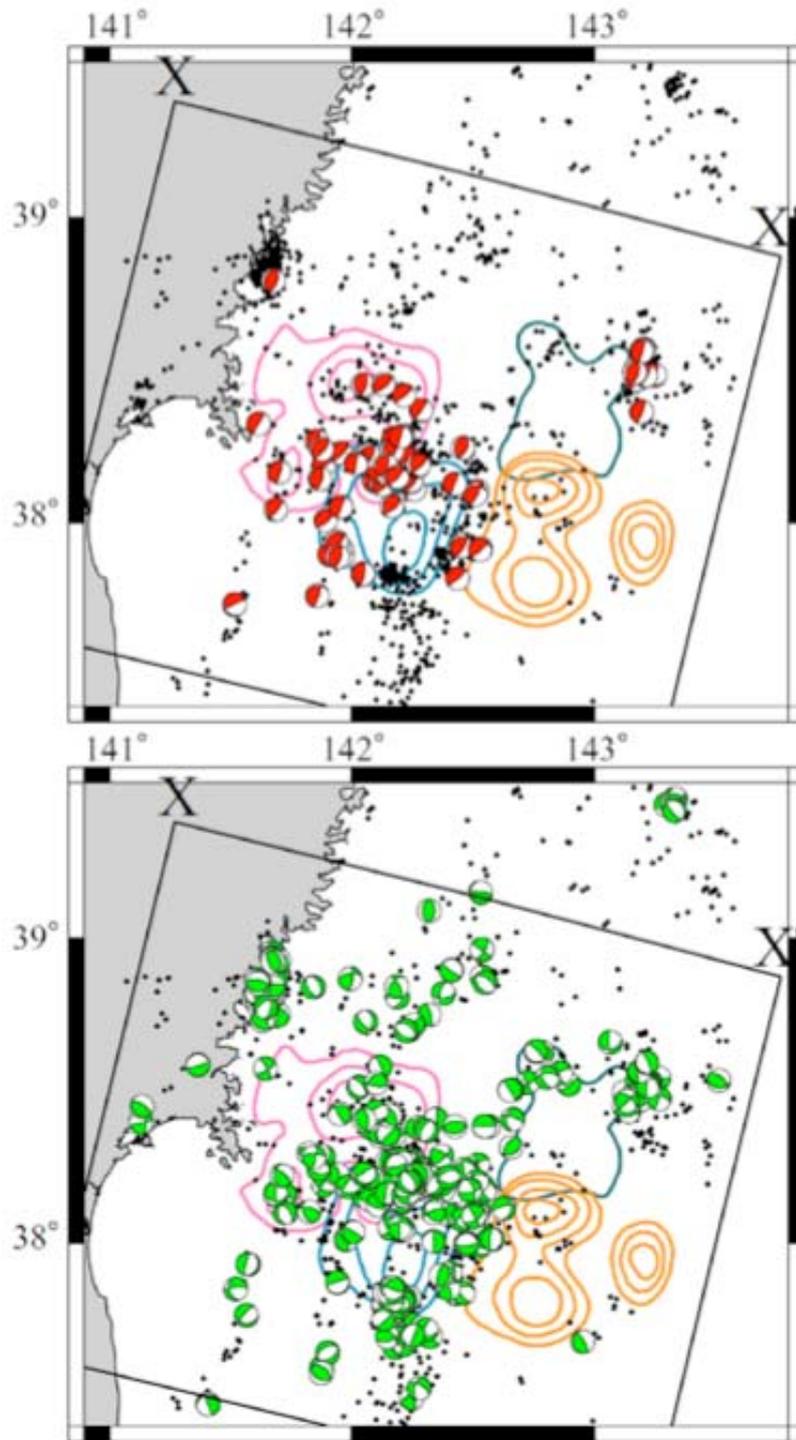


図6 発震機構解の空間分布。プレート境界型（上）および非プレート境界型（下）の地震の発震機構解を赤および緑の震源球で示す（下半球等積投影）。黒点は発震機構解が得られなかった地震を示す。カラーコンターは図3に同じ。

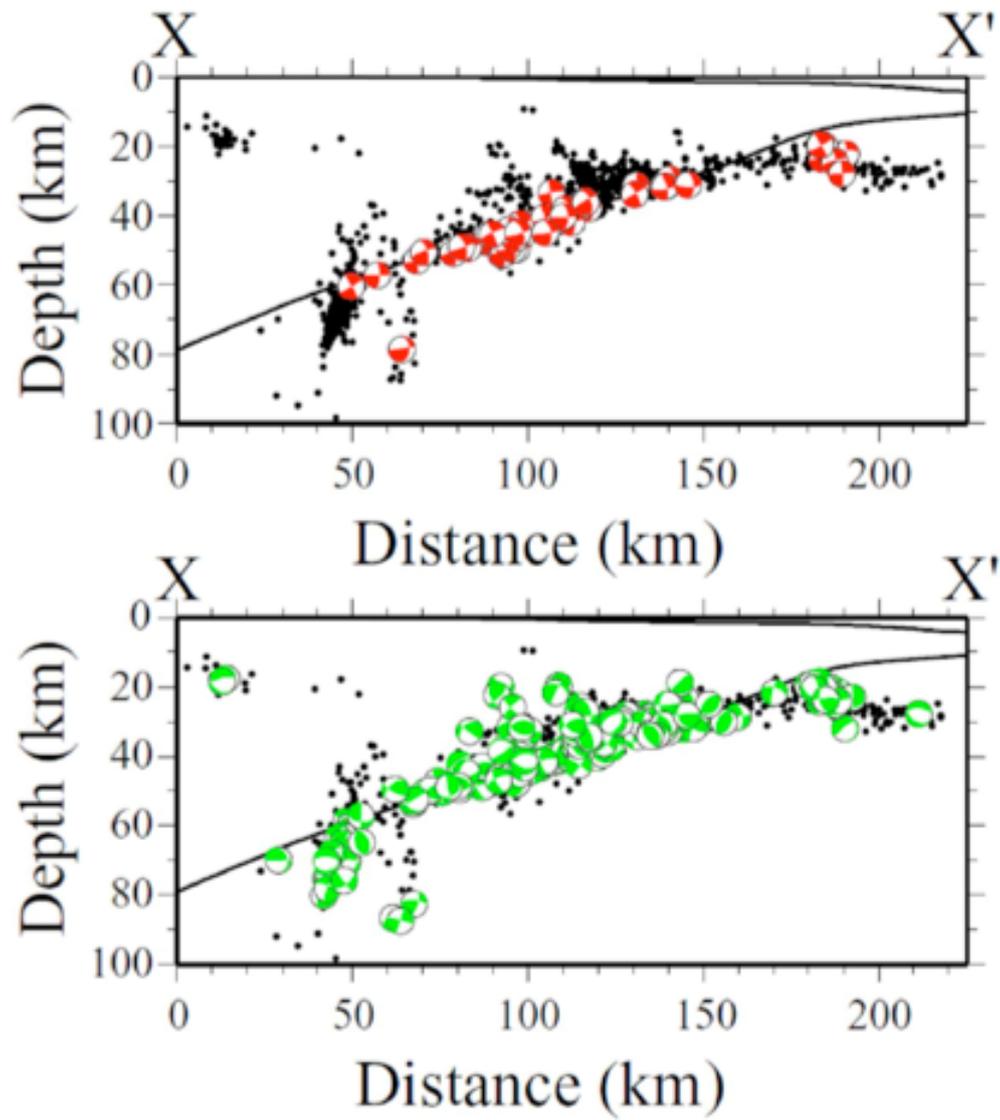


図7 図6の矩形領域内の鉛直断面図。(上)プレート境界型の地震(下)非プレート境界型の地震。

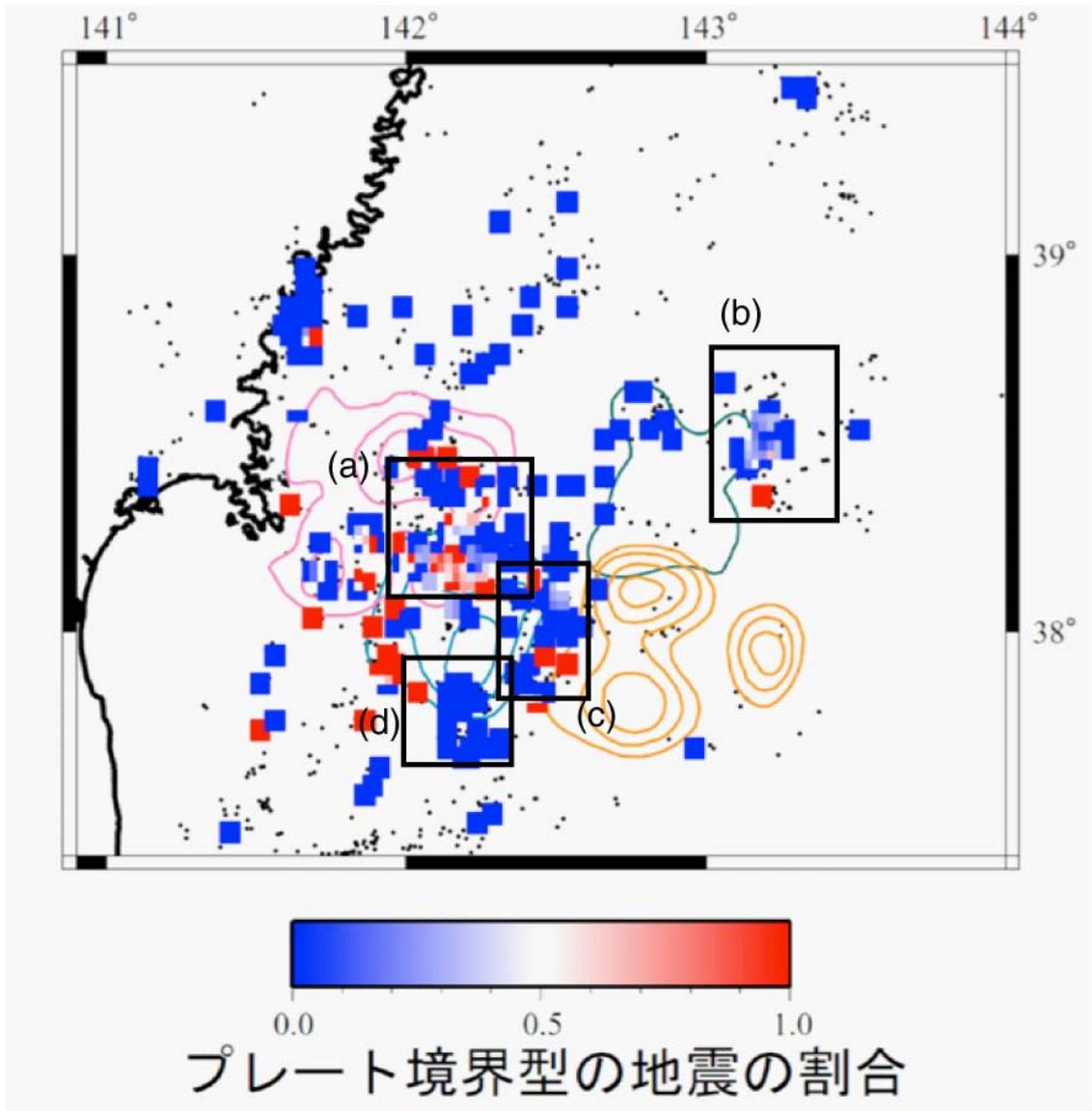


図8 プレート境界型地震の発生割合。発生割合は、 0.05° 四方の領域内におけるプレート境界型の地震と発震機構解が推定された全地震数の比で示す。黒点は震源を示す。矩形領域は図4と同じ。

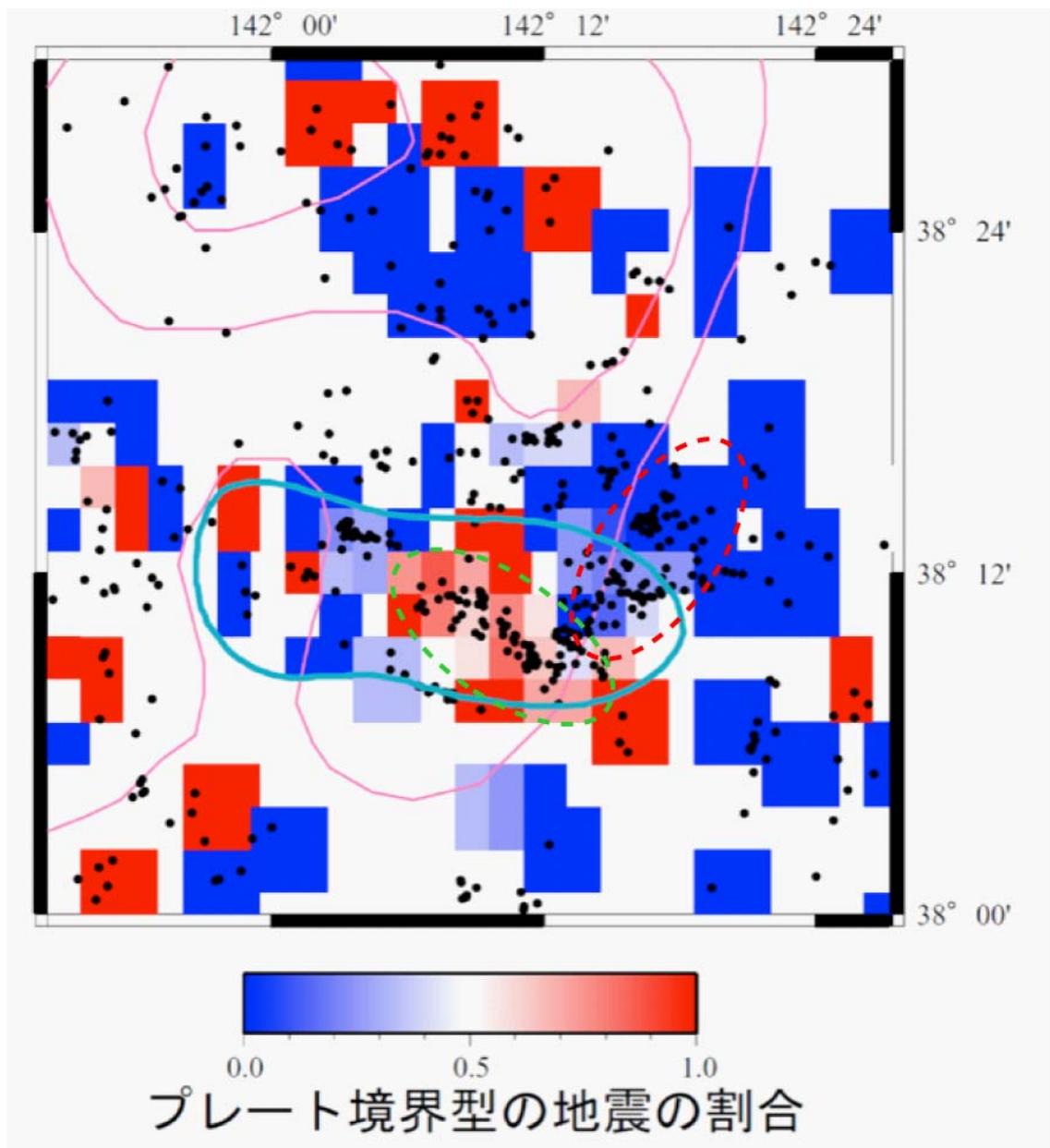


図9 図4領域(a)におけるプレート境界型地震の発生割合。赤と緑色の破線の楕円は本震周辺の2つの地震クラスター。他のシンボルは図3および図8に同じ。

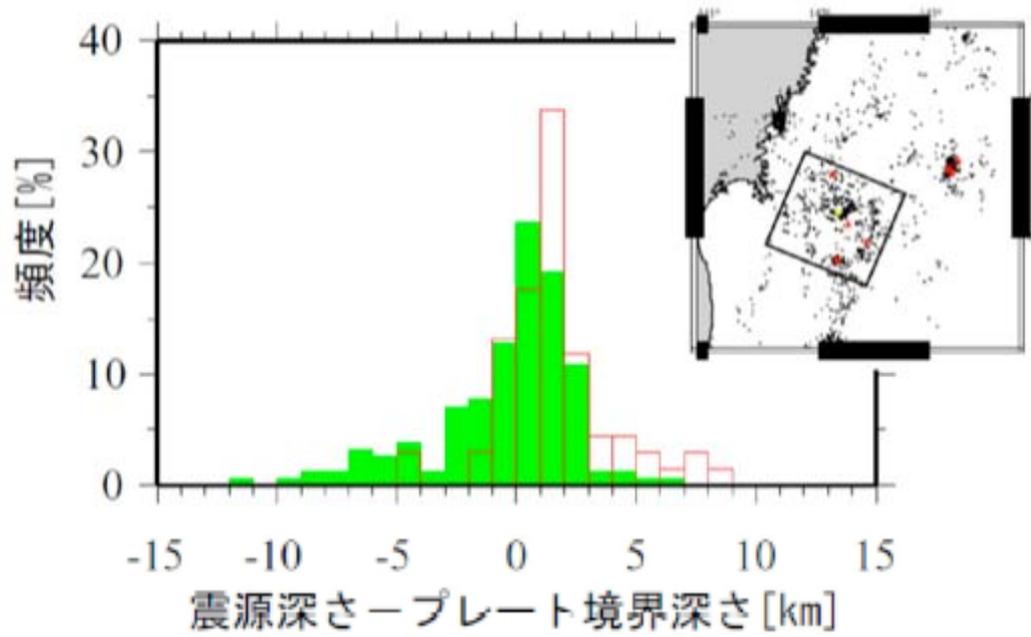


図 10 プレート境界に対する震源の相対的な深さ分布。山本(2007)によるプレート境界からの相対的な震源の深さ頻度を示す。分布は震央分布図中（右上）の矩形領域内について示す。プレート境界型を赤線、非プレート境界型を緑で示す。

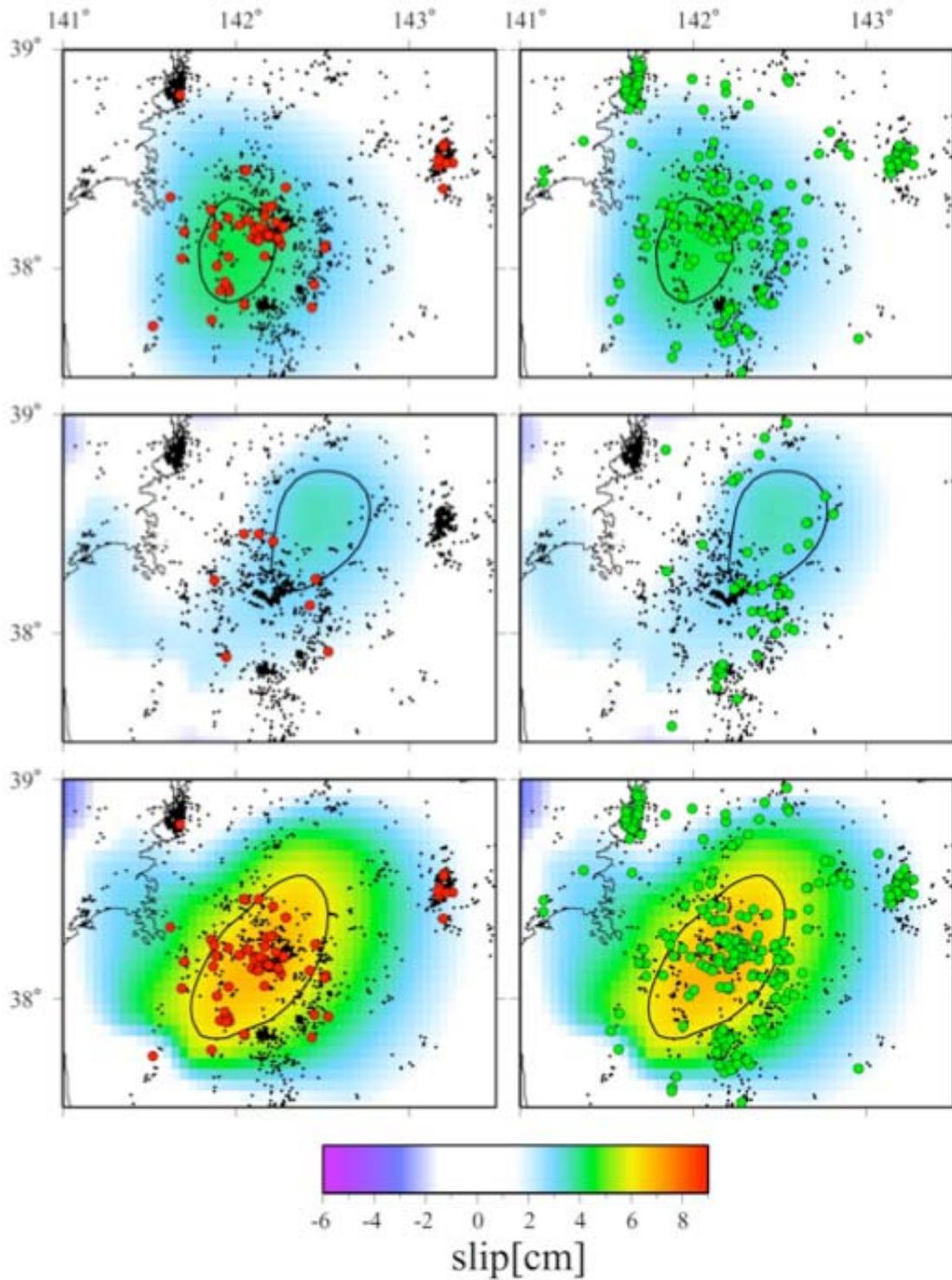


図 11 プレート境界型の地震（左側）と非プレート境界型地震（右側）の分布と余効すべり域の比較。（上）最大余震前。（中）最大余震後。（下）最大余震前と最大余震後の積算。

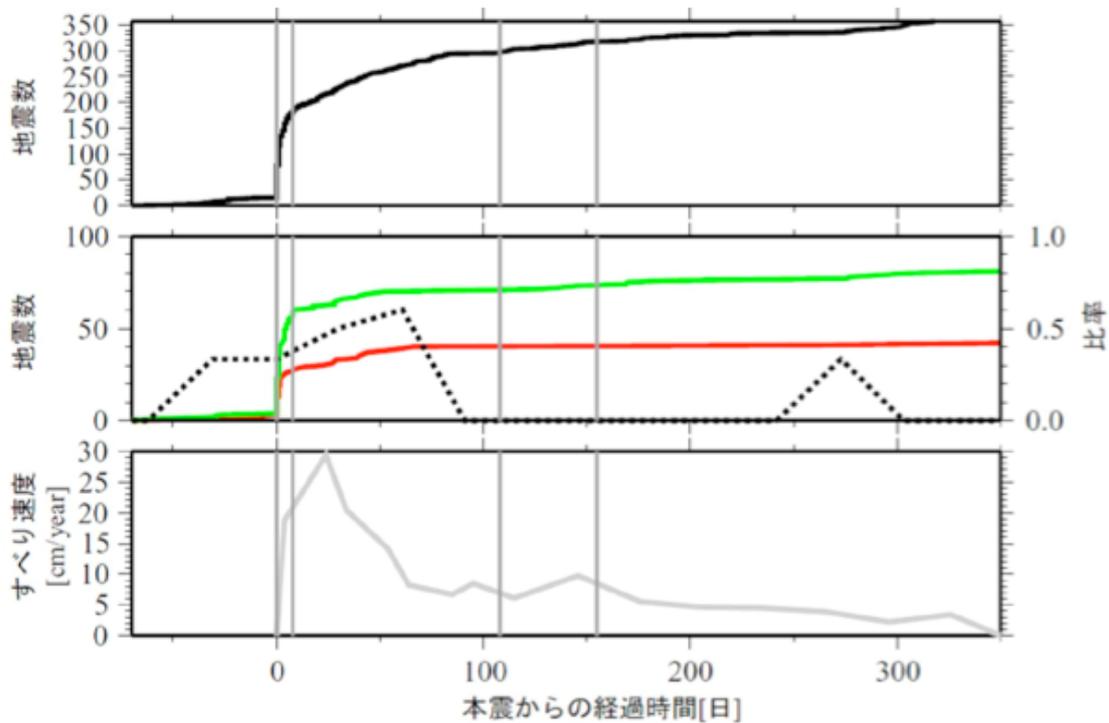


図 12(a) 地震数、プレート境界型と非プレート境界型地震、および余効すべりのすべり速度の時間変化。図 2 の領域(a)について示す。本震発生を 0 日として、縦の灰色実線で、2005 年 8 月 16 日の地震 (本震) (M7.2)、8 月 24 日の地震 (M6.3)、12 月 2 日の最大余震 (M6.6)、2006 年 1 月 18 日の地震 (M5.8) が発生した時間を示す。(上) 領域内のすべての地震の累積個数。(中) プレート境界型 (赤) と非プレート境界型 (緑) 地震の累積個数とプレート境界型地震の割合 (破線)。(下) 余効すべりのすべり速度 (*Miura et al.*, 2006)。

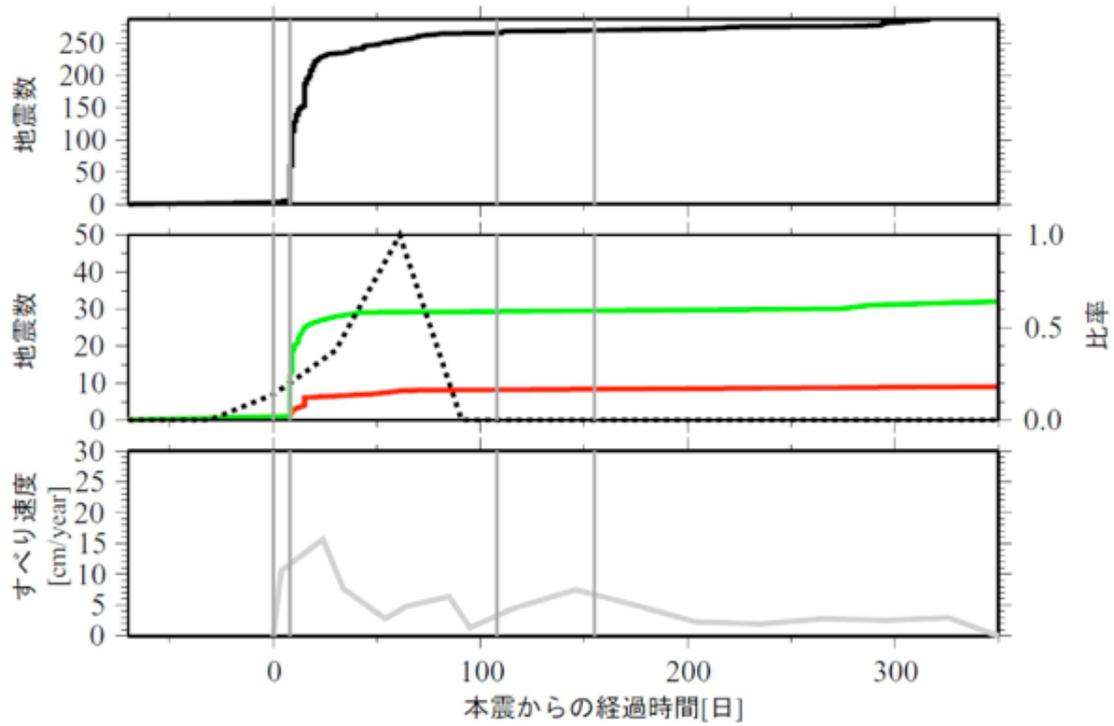


図 12(b) 地震数、プレート境界型と非プレート境界型地震、および余効すべりのすべり速度の時間変化。図 2 の領域(b)について示す。他は図 12(a)と同様である。

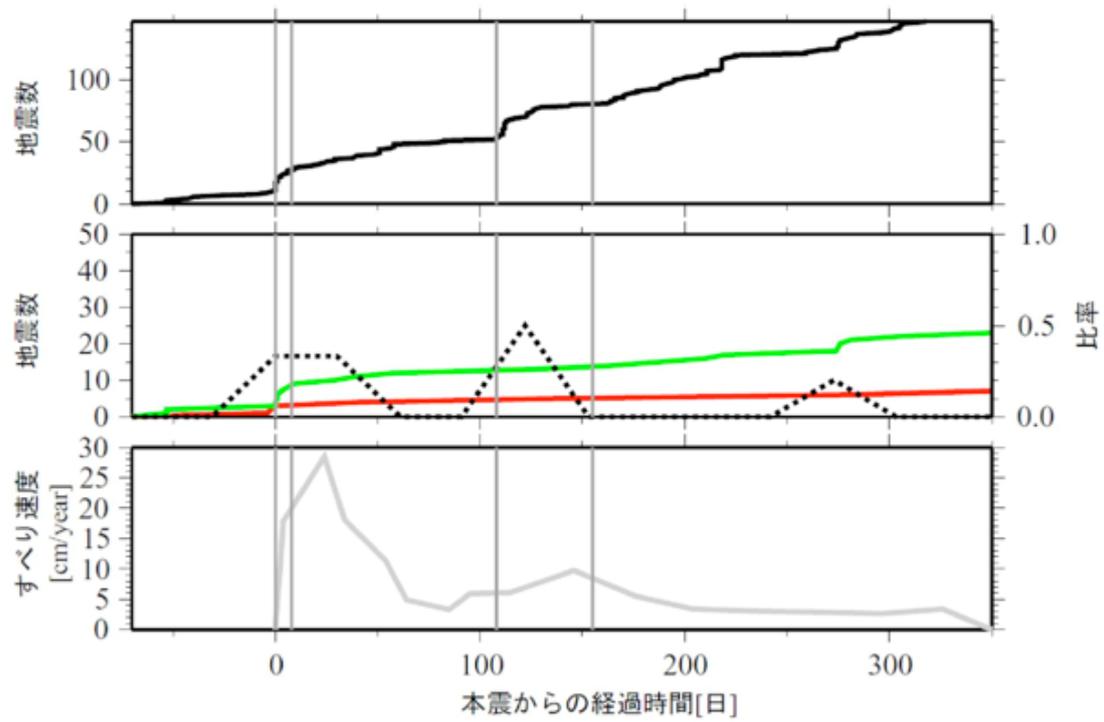


図 12(c) 地震数、プレート境界型と非プレート境界型地震、および余効すべりのすべり速度の時間変化。図 2 の領域 (b) について示す。他は図 12(c) と同様である。

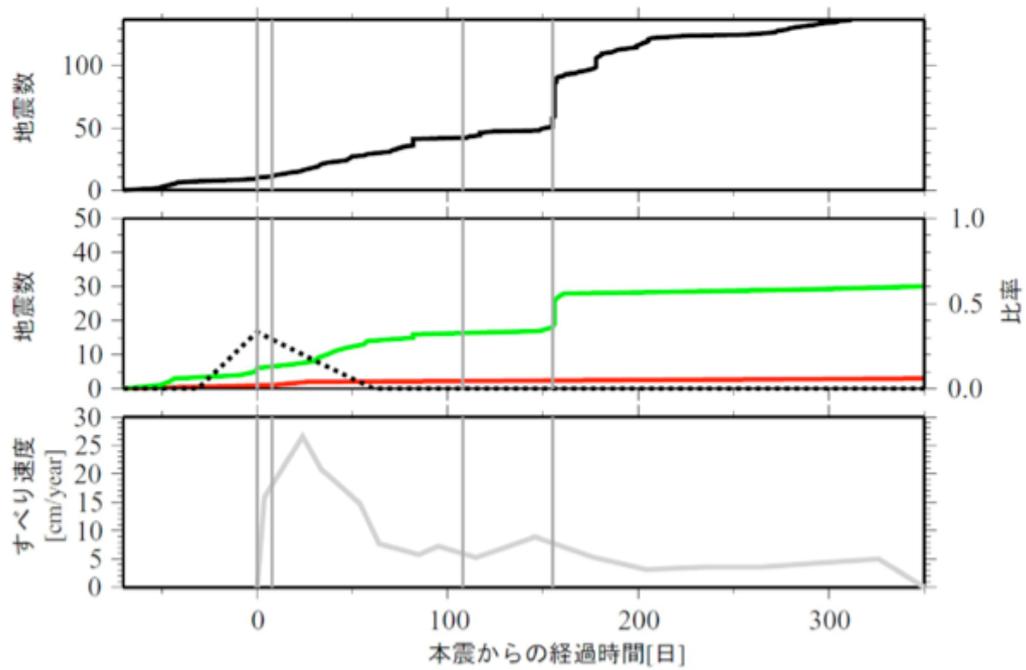


図 12(d) 地震数、プレート境界型と非プレート境界型地震、および余効すべりのすべり速度の時間変化。図 2 の領域 (b) について示す。他は図 12(d) と同様である。

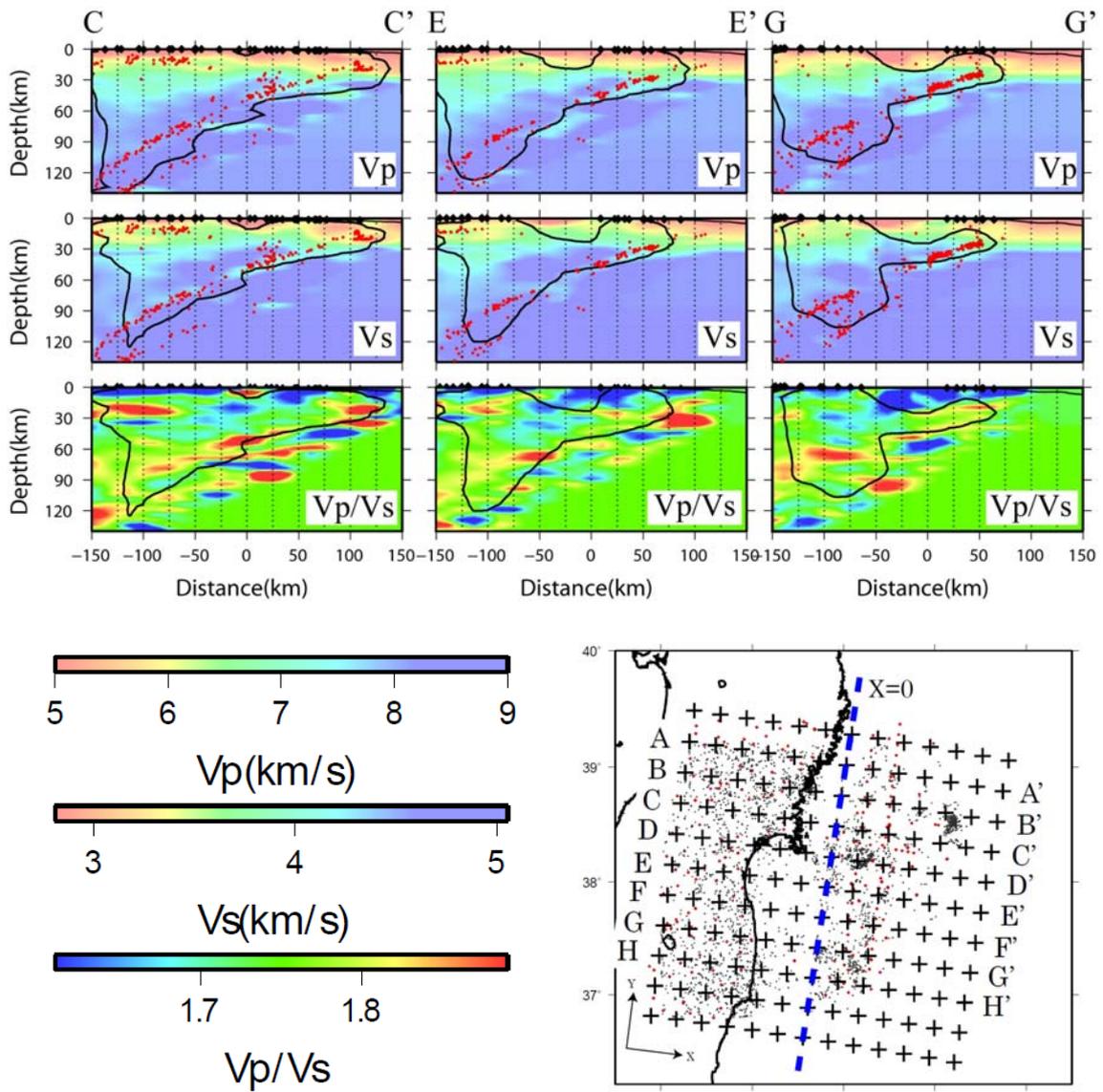


図 13 Double-Difference トモグラフィー法で推定した V_p 、 V_s および V_p/V_s 構造の鉛直断面図。右下図中の CC' 断面、 EE' 断面、 GG' 断面を示す。それぞれ $\pm 15\text{km}$ 以内の地震を赤点で示す。

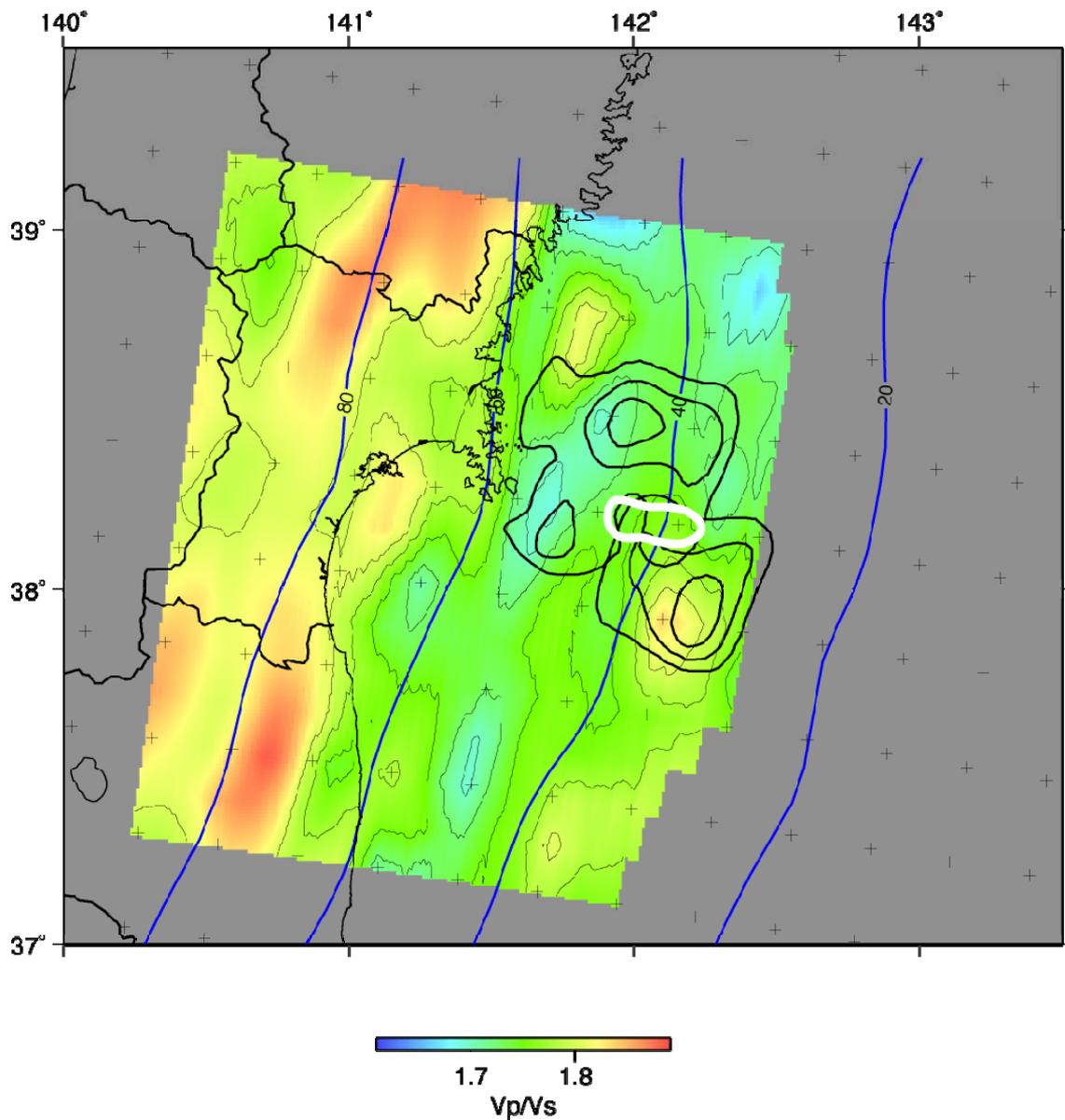


図 14 マントルウェッジ内の V_p/V_s 分布。山本(2007)によるプレート境界の等深度線を青線で示す。プレート境界よりも 2km から 12km 浅い領域の V_p と V_s の平均速度を求めた後、 V_p/V_s 比を求めて表示した。赤は *Yamanaka & Kikuchi* (2004) によるアスペリティ、白線は *Yaginuma et al.* (2006) による 2005 年 8 月の宮城沖の地震のアスペリティを示す。

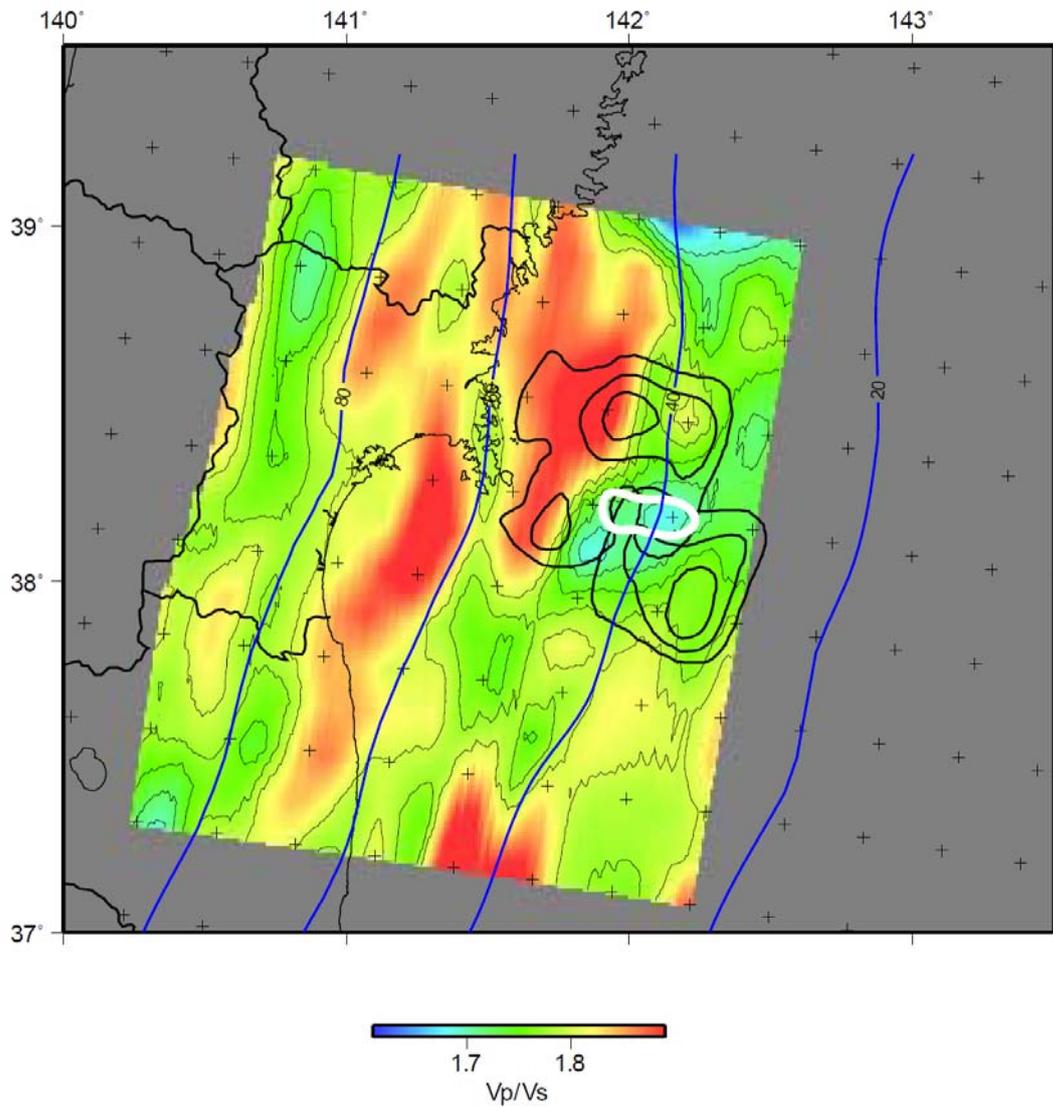


図 15 海洋性地殻内の V_p/V_s 分布。山本(2007)によるプレート境界の等深度線を青線で示す。黒コンターは Yamanaka & Kikuchi (2004)によるアスペリティ、白線は Yaginuma et al. (2006)による 2005 年 8 月の宮城沖の地震のアスペリティを示す。

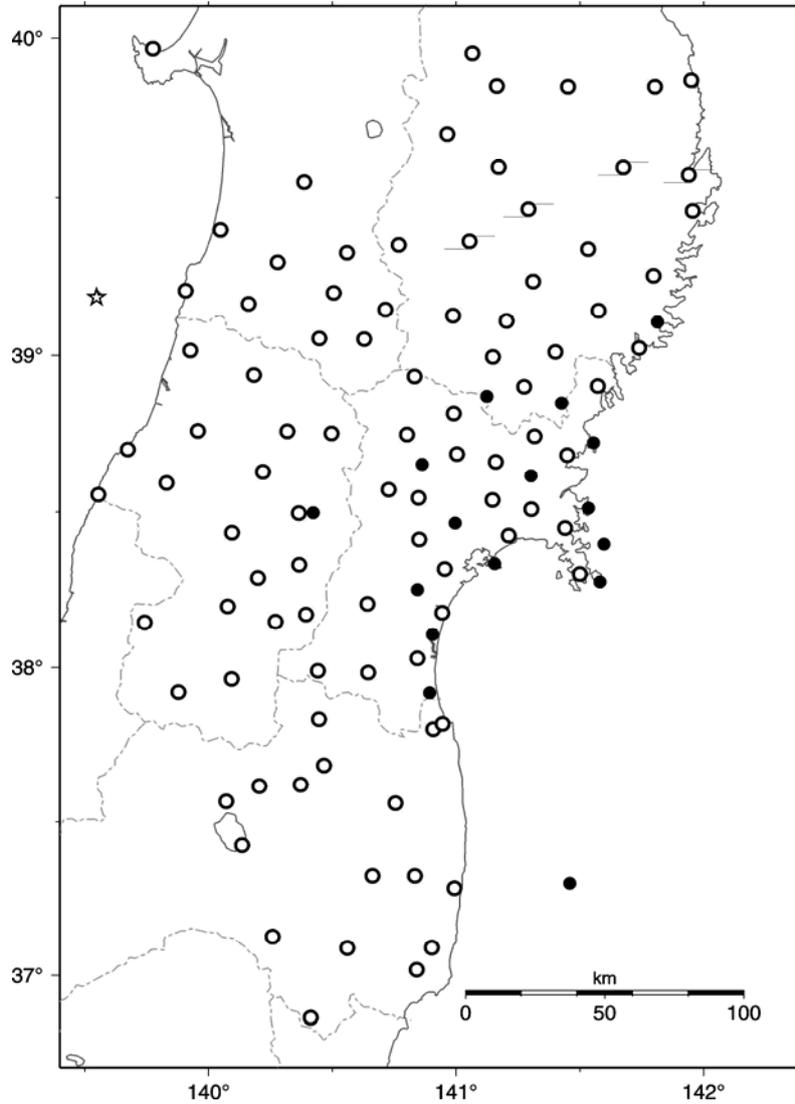


図 16 東北地方中南部の GPS 連続観測点分布図。白丸は国土地理院の GEONET 観測点、黒丸は東北大学の観測点を示す。

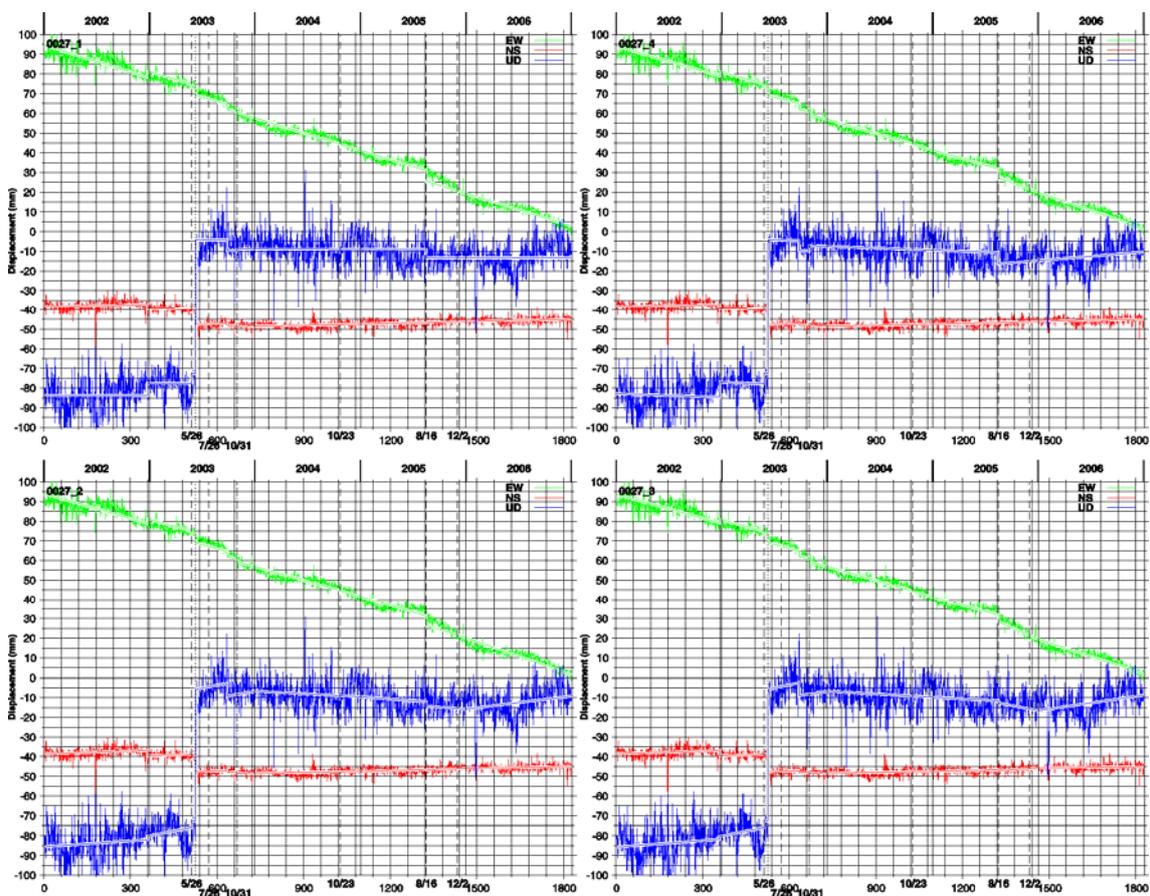


図 17 GPS データから推定された変位時系列の例(GEONET 久慈の座標変化、固定点は飛島)。トレンドの推定を、(左上)五年間通して、(右上)2005 年宮城県沖地震以前・以後で分けて、(左下)年ごとに、(右下)年ごとに分け、かつ 2005 年を 2005 年宮城県沖地震以前・以後で分けて、それぞれ行なった。年周・半年周成分を除いた観測値を実線で、推定されたトレンドとステップから期待される座標変化を白縁取りの線で図示してある。赤、緑、青は、それぞれ、北向き、東向き、上向きの変位を示す。縦方向の破線は大きな(M>6)地震の発生日を、点線はサイトのメンテナンス日をそれぞれ示す。

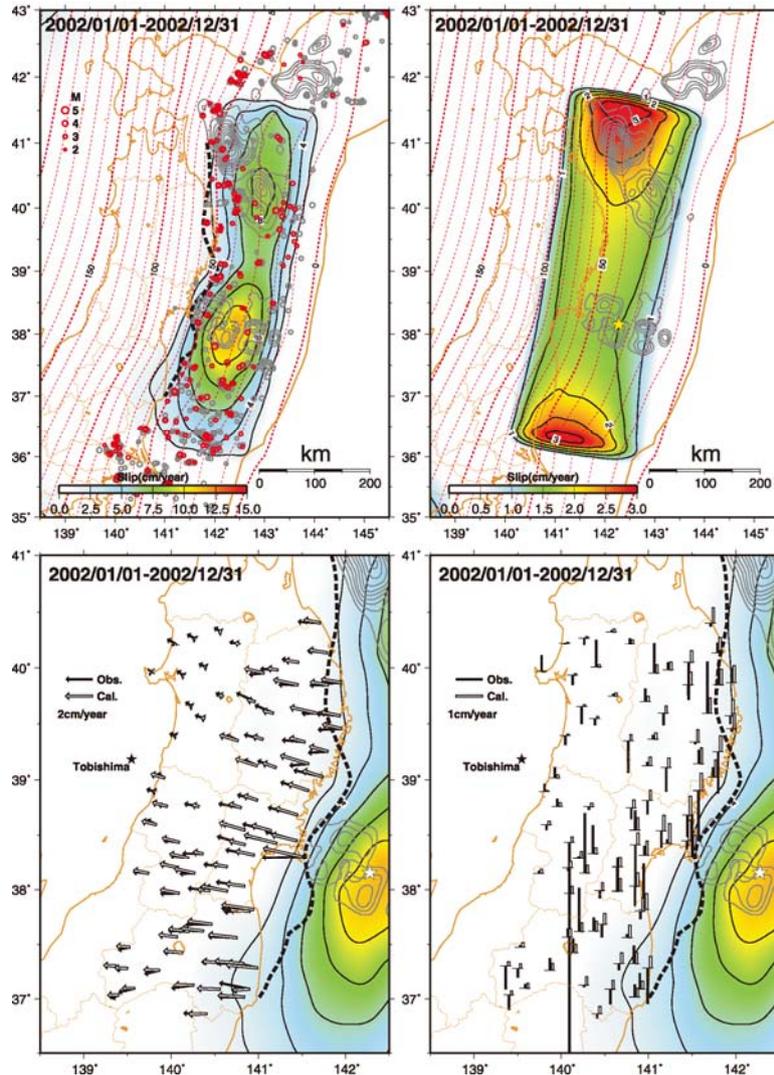


図 18(a) バックスリップインバージョン解析により推定されたプレート間のすべり欠損分布(2002 年一年間)。(左上) 推定されたすべり欠損分布。コンター間隔は 2cm/yr。丸印は小繰り返し地震の震源で、赤が当該期間中に発生したもの、灰色が 2002 年から 2006 年の全期間に発生したものを示す。黒破線は *Igarashi et al.* (2001)による低角逆断層型地震の西縁、赤破線はプレート境界面の深さを示す。灰色の等値線は北から 2003 年十勝沖地震、1968 年十勝沖地震、1978 年(陸側)・1981(海側)・1936 年の宮城県沖地震、2003 年の福島県沖地震のアスペリティをそれぞれ示す (*Yamanaka & Kikuchi, 2003; Yamanaka & Kikuchi, 2004; 山中, 2003*)。 (右上) 推定されたバックスリップの誤差の分布。等値線間隔は 1cm。(左下・右下) 各期間における GPS 変位速度(黒)と、推定されたバックスリップ分布から期待される変位速度(白抜き)との比較。★は固定点である飛島を示す。左下は水平成分、右下は上下成分を示している。

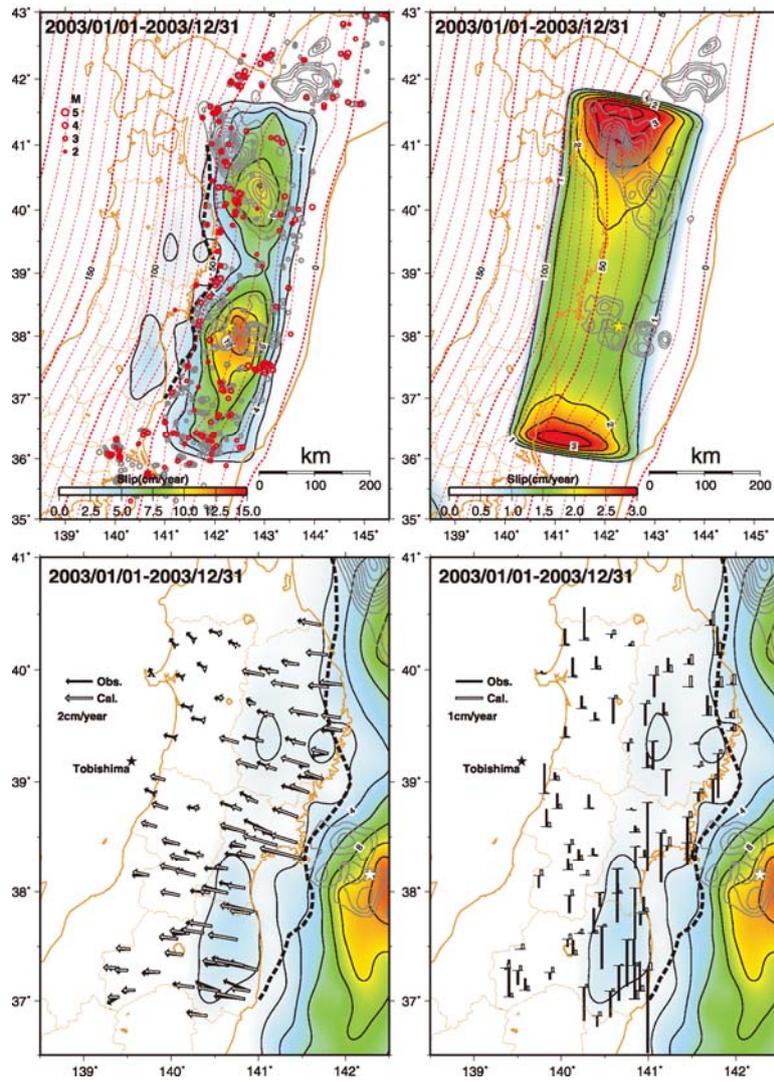


図 18(b) (a)と同じ。ただし 2003 年 1 年間の結果を示す。

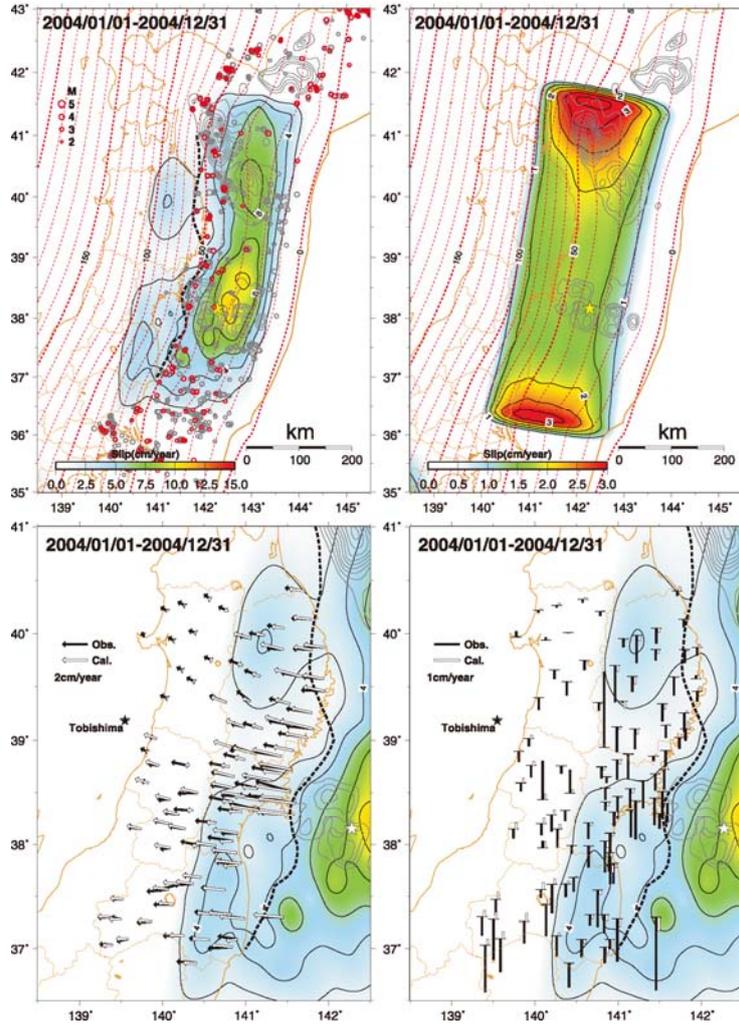


図 18(c) : (a)に同じ。ただし 2004 年 1 年間の結果を示す。

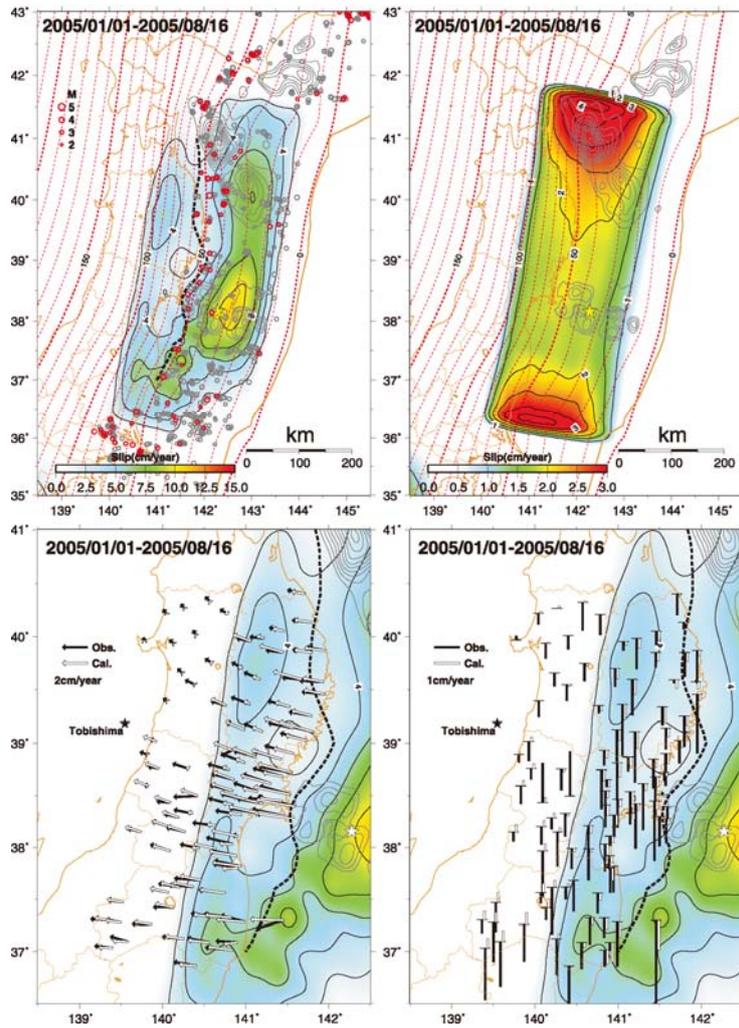


図 18(d): (a)に同じ。ただし 2005 年 1 月から 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖地震 (M7.2) 発生前までの期間の結果を示す。

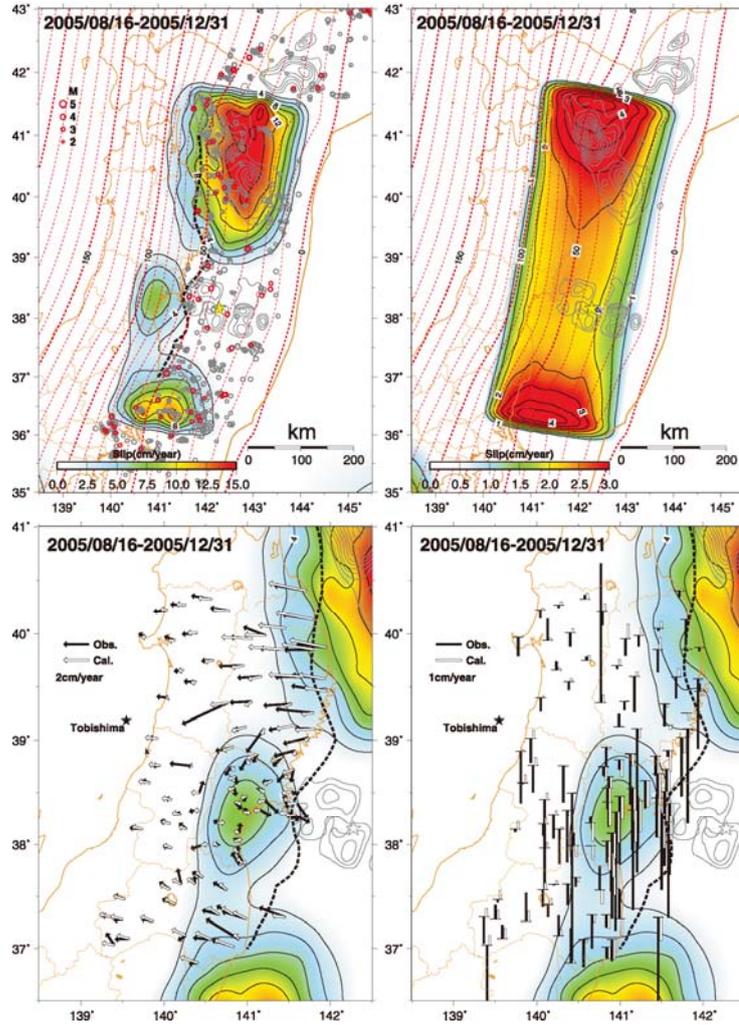


図 18(e): (a)に同じ。ただし 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖地震 (M7.2) 発生後から 2005 年 12 月 31 日までの期間の結果を示す。

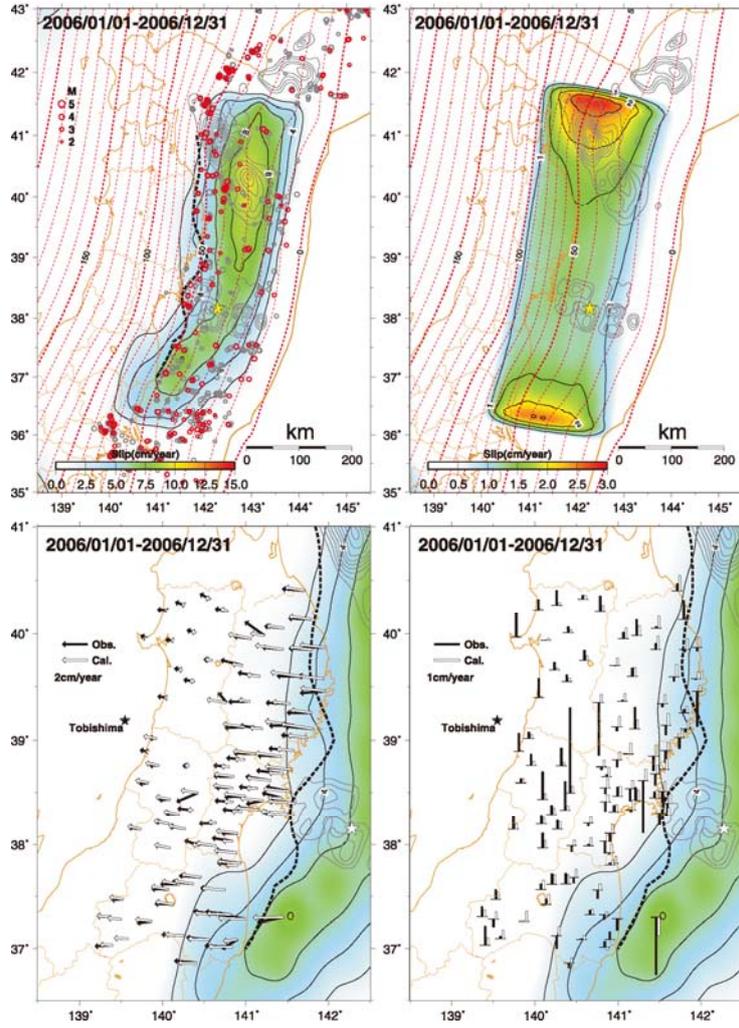


図 18(f) : (a)に同じ。ただし 2006 年 1 年間の結果を示す。

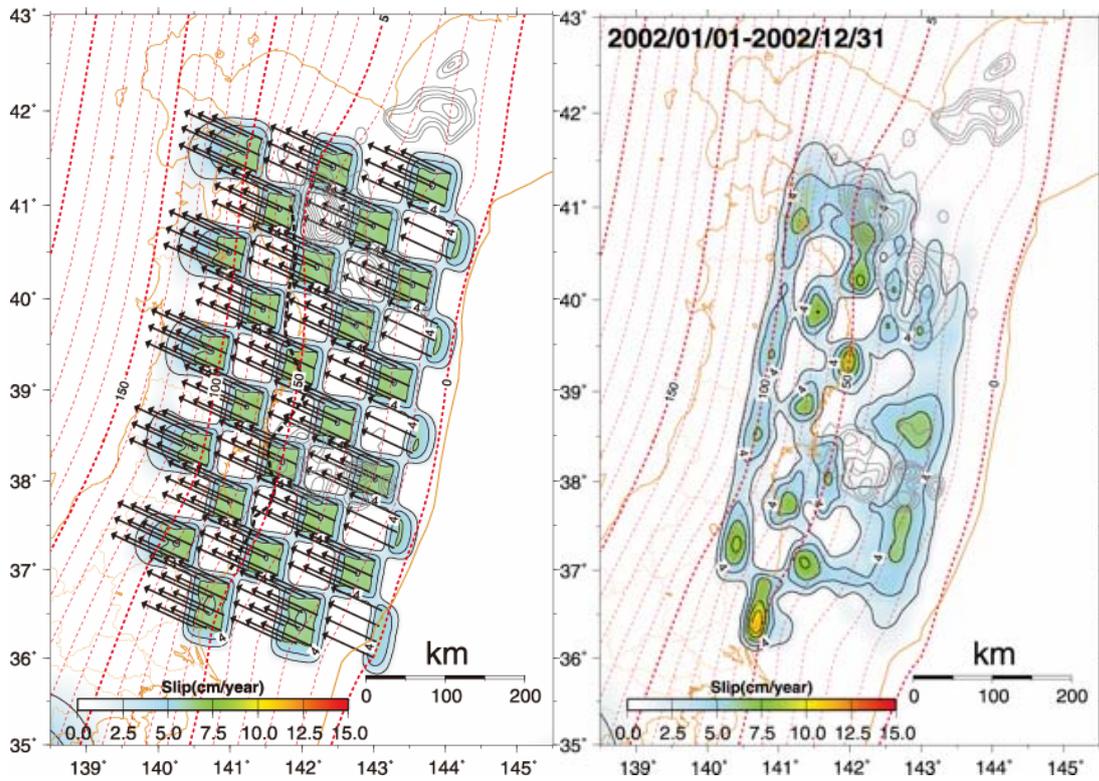


図 19 チェッカーボードテストの結果。左図のように、すべりが無い部分とプレート収束方向に 3cm/year のすべり速度を与えた部分とを配置して、各観測点での変位速度を計算し、変位速度の各成分にそれぞれ最大 10%の誤差を乱数で与え、それを元に逆解析を行なった結果を右図に示す。

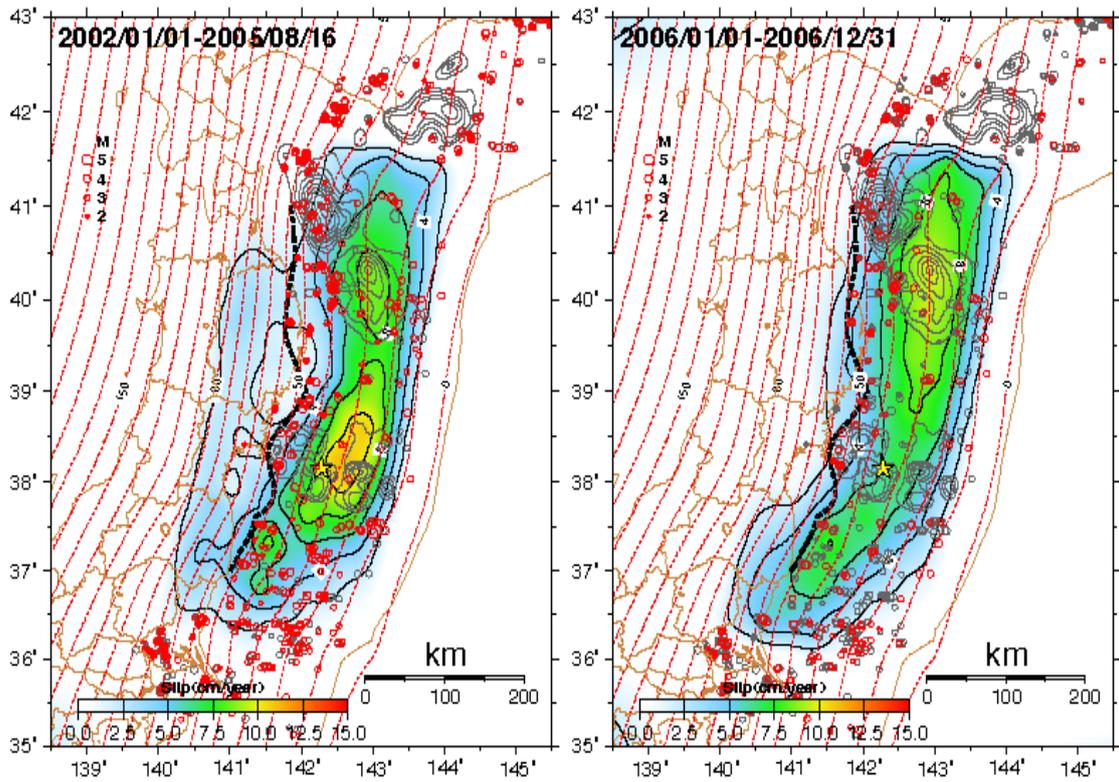


図 20 2005 年 8 月 16 日宮城県沖地震前後のバックスリップの分布。(左) 2002 年 1 月 1 日から 2005 年 8 月 16 日まで。(右) 2006 年 1 月 1 日から 2006 年 12 月 31 日まで。小円は 2002 年から 2006 年までに発生した小繰り返し地震の震源であり、それぞれの期間内に発生したものを赤、それ以外を灰色で示す。黒破線は *Igarashi et al.* (2001) による低角逆断層型地震の西縁を示す。赤破線は想定したプレート境界面の等深線で、間隔は 10 km。

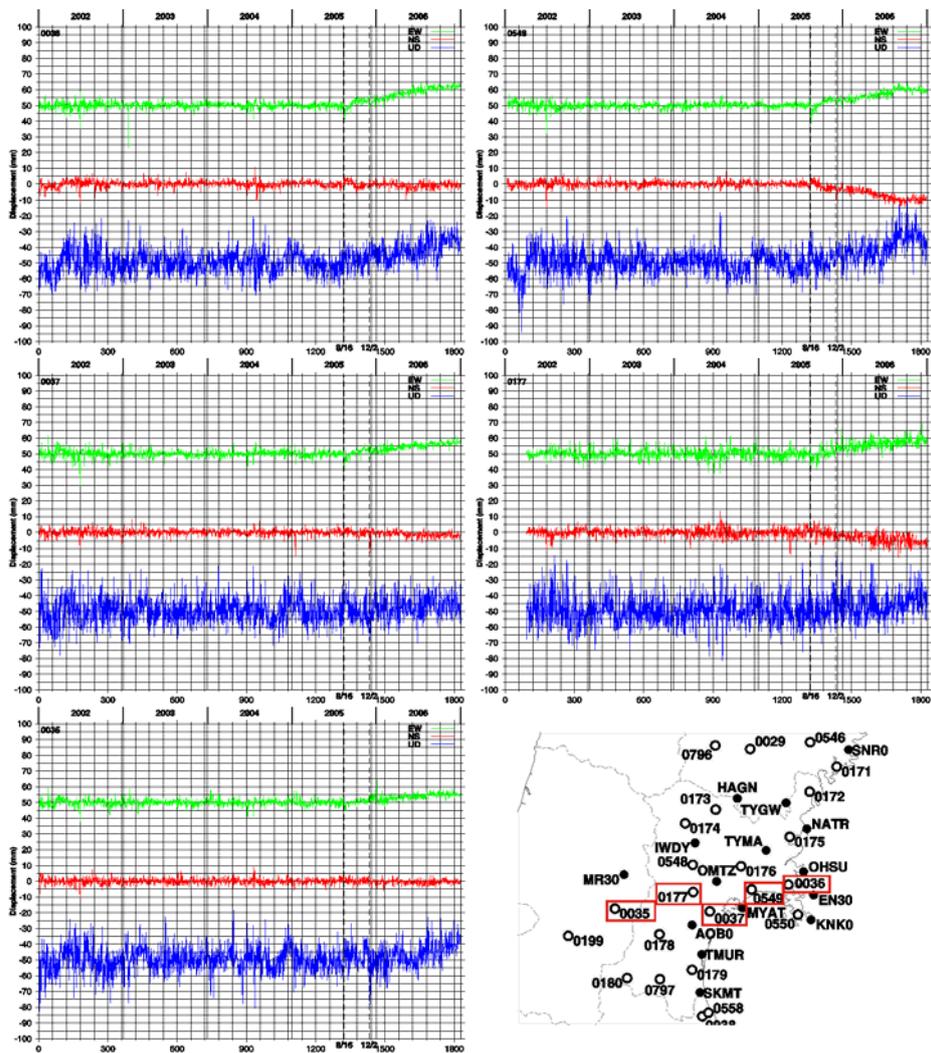


図 21 GPS 観測から得られた観測点座標時系列の例。年周・半年周成分、ステップ変動、2005 年 8 月 16 日以前のトレンドから推定される定常変動成分を除去したものを示す。右下の地図において赤枠で囲まれている観測点のものを抜き出してある。赤、緑、青は、それぞれ、北向き、東向き、上向きの変位を示す。縦方向の破線は 2005 年 8 月の宮城県沖の地震及びその最大余震の発生日を示す。

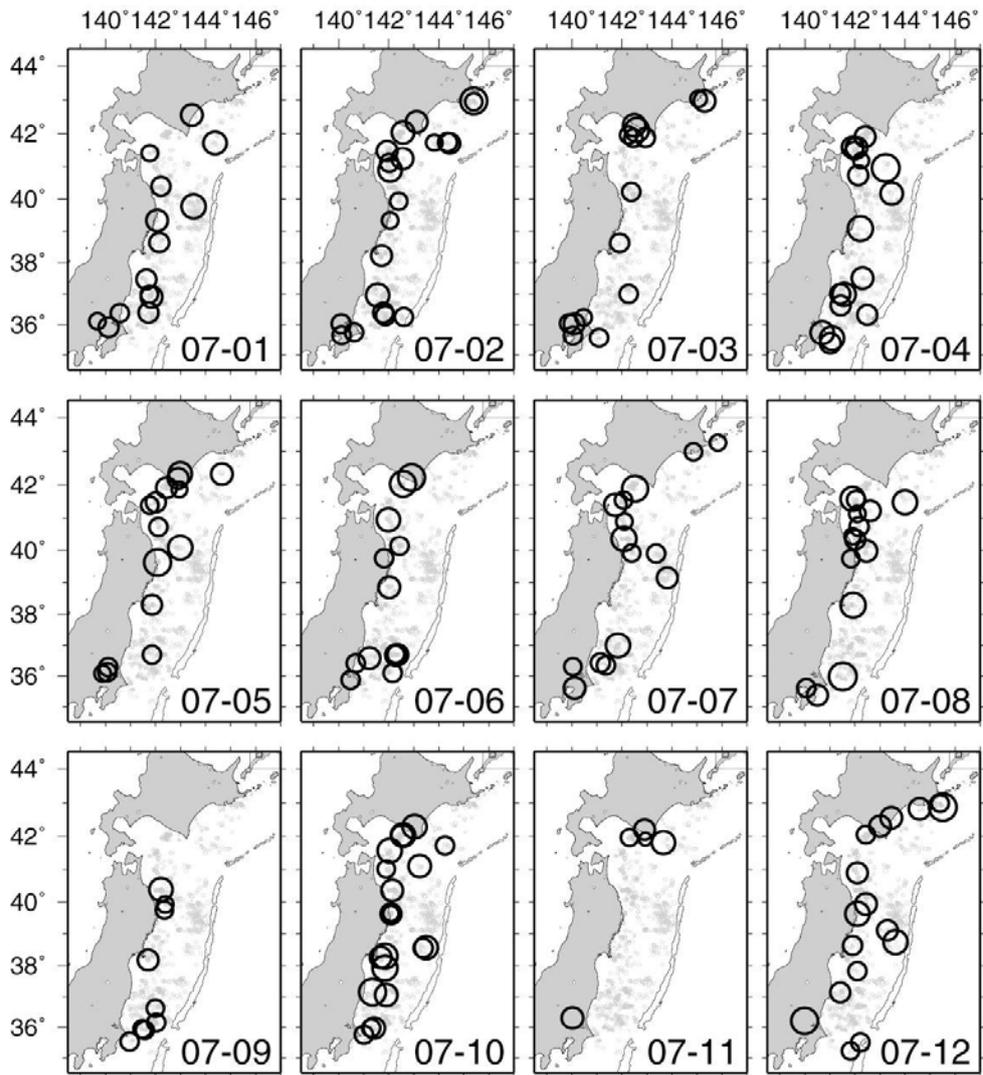


図 22 2007 年一年間に発生した相似地震の分布。1 月から 12 月まで月ごとに示す。

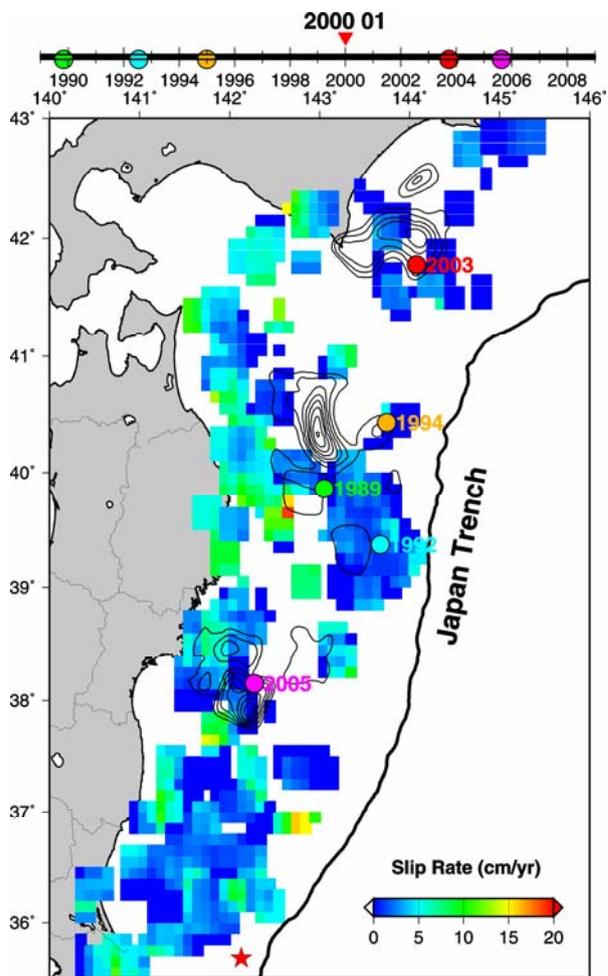


図 23(a) : 相似地震活動から推定されたプレート境界面上での滑り速度分布の例。2000 年 1 月から過去一年間に遡った期間に発生した相似地震から求めたものを示す。

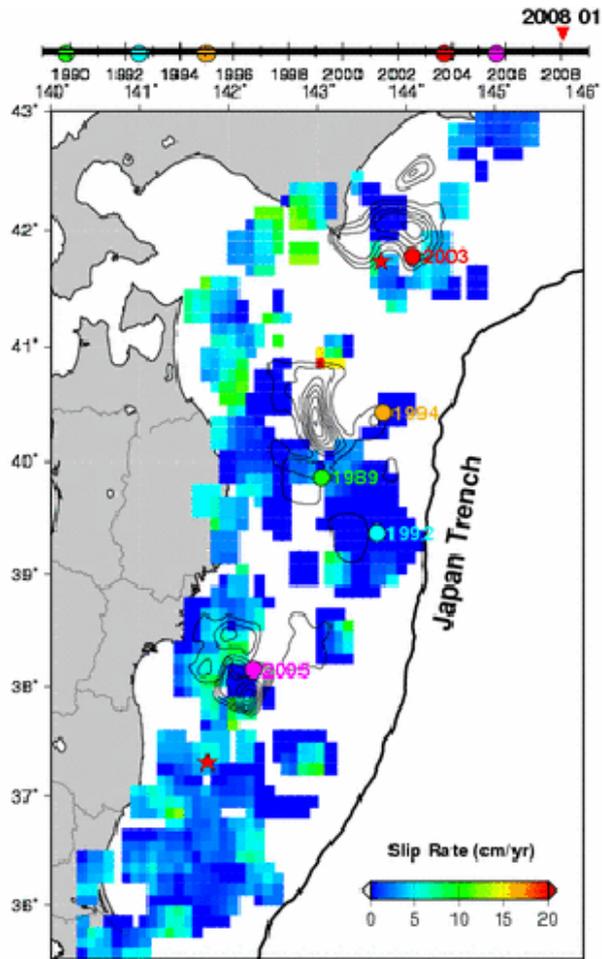


図 23(b)： 相似地震活動から推定されたプレート境界面上での滑り速度分布の例。2006 年 1 月から過去一年間に遡った期間に発生した相似地震から求めたものを示す。

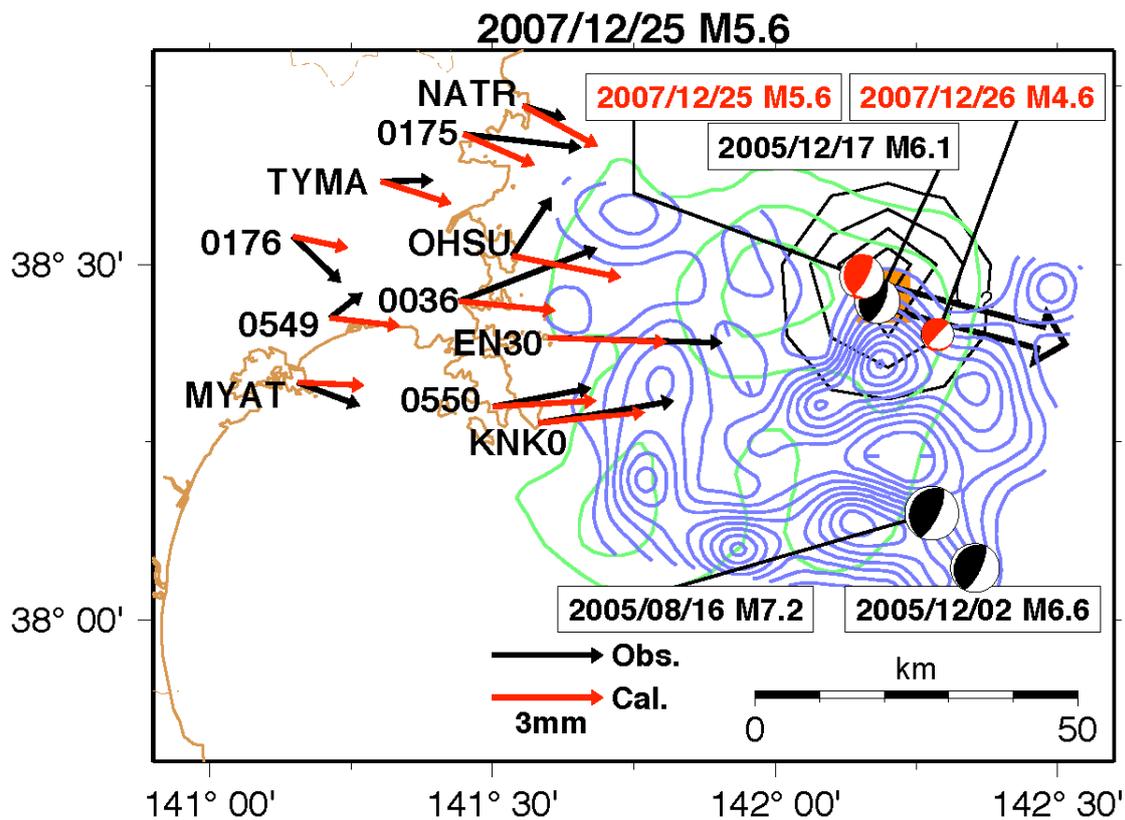


図 24 2007 年 12 月 25 日宮城県沖地震 (M5.6) に伴う地殻変動。黒矢印：GPS 連続観測点において観測された地震に伴った水平変動 (12 月 20 日から 24 日までの平均座標値を、12 月 26 日から 30 日までの平均座標値から差し引いた結果)。黒等値線：Yagi & Kikuchi (2003) のインバージョン法により推定された地震時すべり。等値線間隔は 3cm。赤矢印：推定された地震時すべりから計算された水平変動。赤の震源球：2007 年 12 月 25 日の地震 (M5.6)。および同年同月 26 日の地震 (M4.6)。青等値線：柳沼 (2007) が地震波形インバージョンにより推定した 1978 年宮城県沖地震の地震時すべり分布。等値線間隔は 26 cm。緑等値線：Yamanaka & Kikuchi (2003) が地震波形インバージョンにより推定した 1978 年宮城県沖地震の地震時すべり分布。等値線間隔は 50 cm。

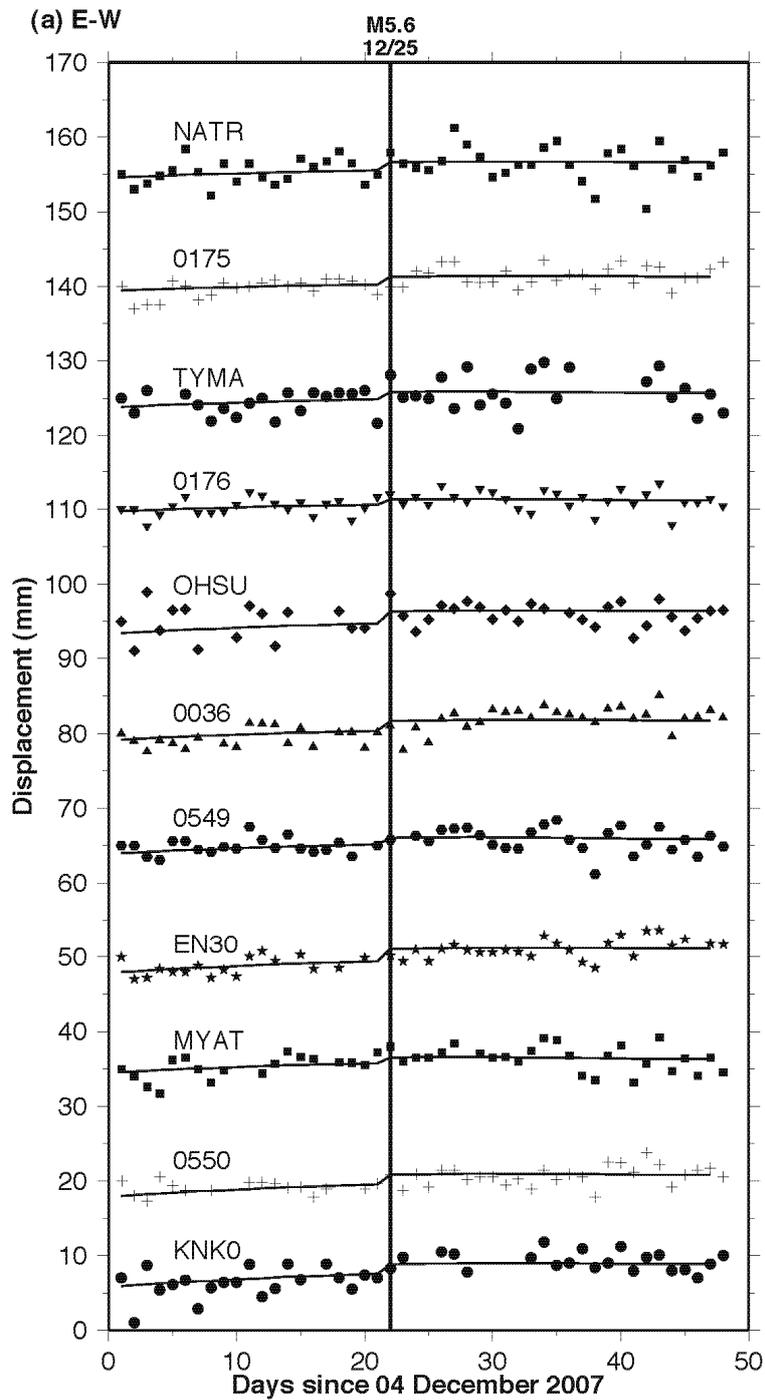


図 25(a) 2007 年 12 月 25 日宮城県沖地震 (M5.6) 前後の GPS 観測点の経度変化。横軸 22 日目の縦線が M5.6 の地震が発生した 12 月 25 日を示す。

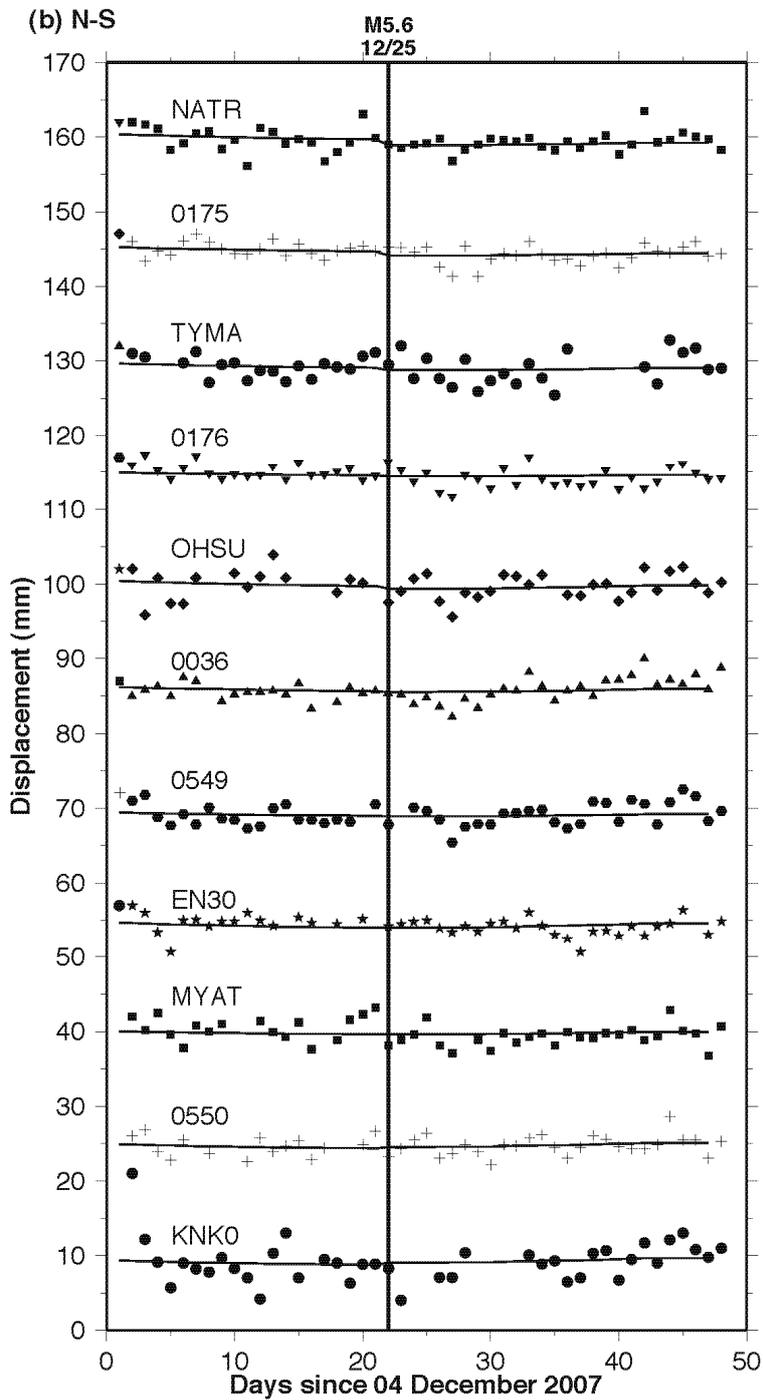


図 25(b) 2007 年 12 月 25 日宮城県沖地震 (M5.6) 前後の GPS 観測点の緯度変化。横軸 22 日目の縦線が M5.6 の地震が発生した 12 月 25 日を示す。

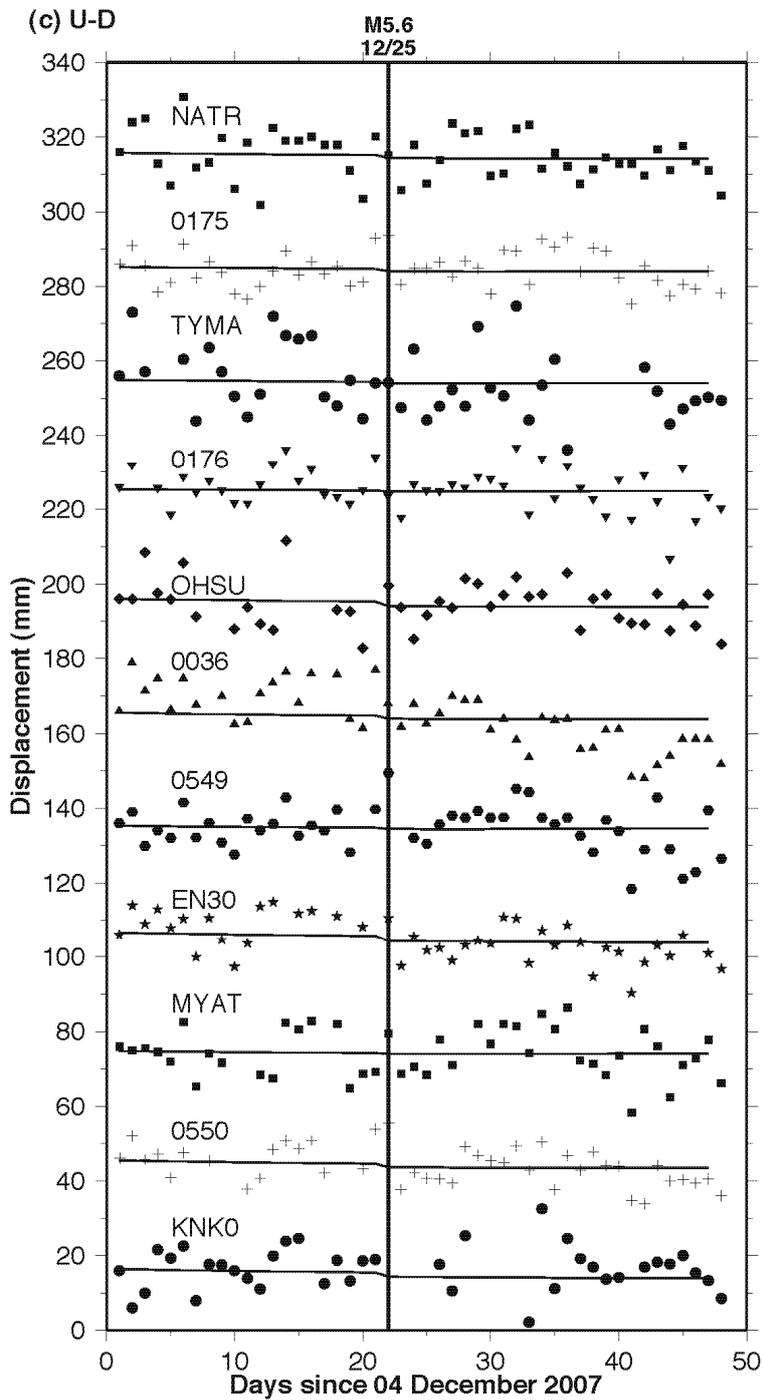


図 25(c) 2007 年 12 月 25 日宮城県沖地震 (M5.6) 前後の GPS 観測点の楕円体高変化。横軸 22 日目の縦線が M5.6 の地震が発生した 12 月 25 日を示す。

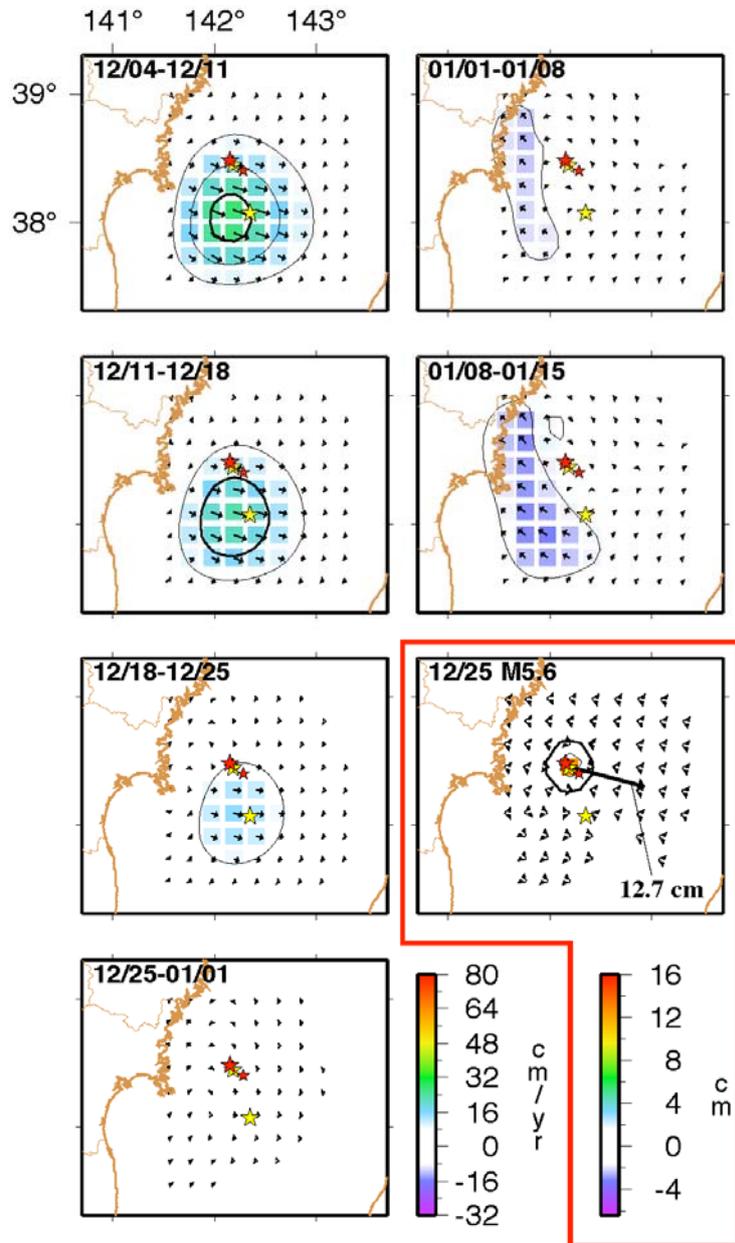


図 26(a) 2007 年 12 月 25 日宮城県沖地震 (M5.6) 前後のプレート境界上のすべりの時空間変化のスナップショット。Yagi & Kikuchi (2003) のインバージョン法により推定されたプレート境界上のすべり分布を 12 月 4 日から 1 週間毎にスナップショットで示す。右下の赤枠内のパネルは、同時に推定された 12 月 25 日の M5.6 の地震に伴う地震時すべり分布を示す。黄色星印は、南側が 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖地震 (M7.2)、北側が 2005 年 12 月 17 日の M6.1 の地震、大小の赤星印は、2007 年 12 月 25 日の M5.6 の地震と同年同月 26 日の地震 (M4.6) の震央を示す。太い等値線は推定誤差 2σ (図 12(b)参照) に相当している。

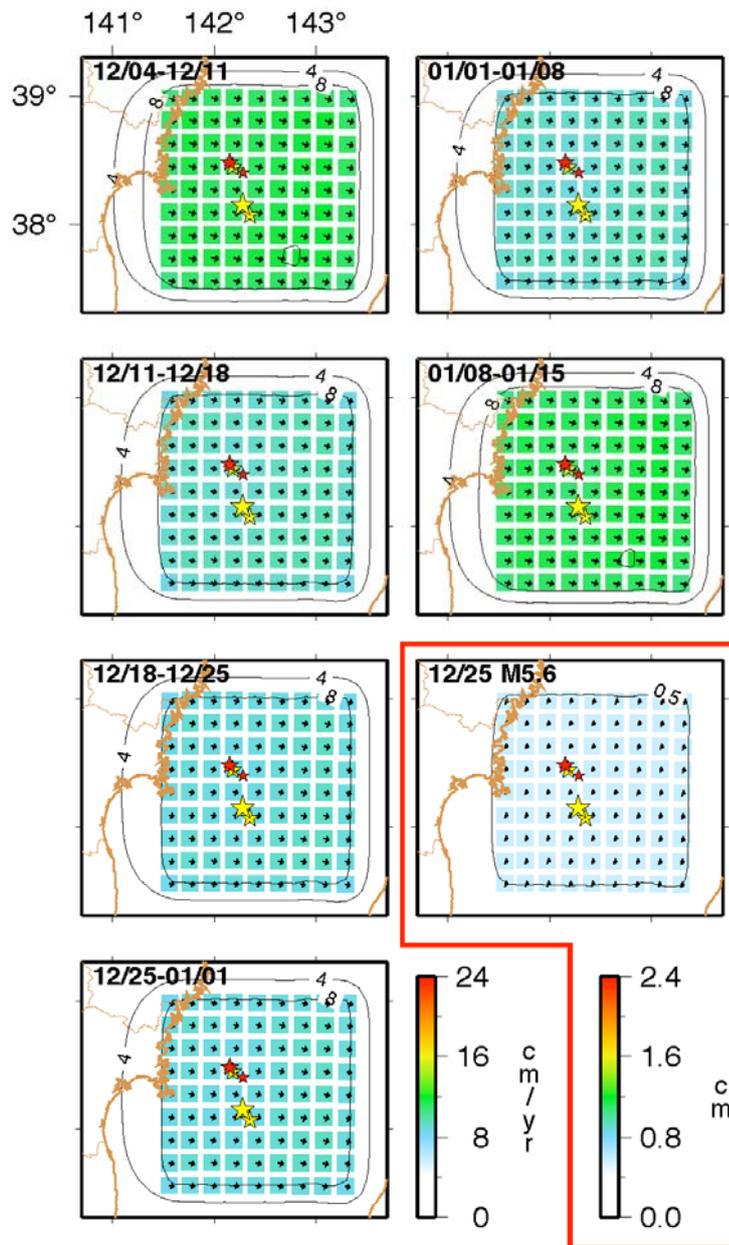


図 26(b) (a)で示したすべり分布の推定誤差。

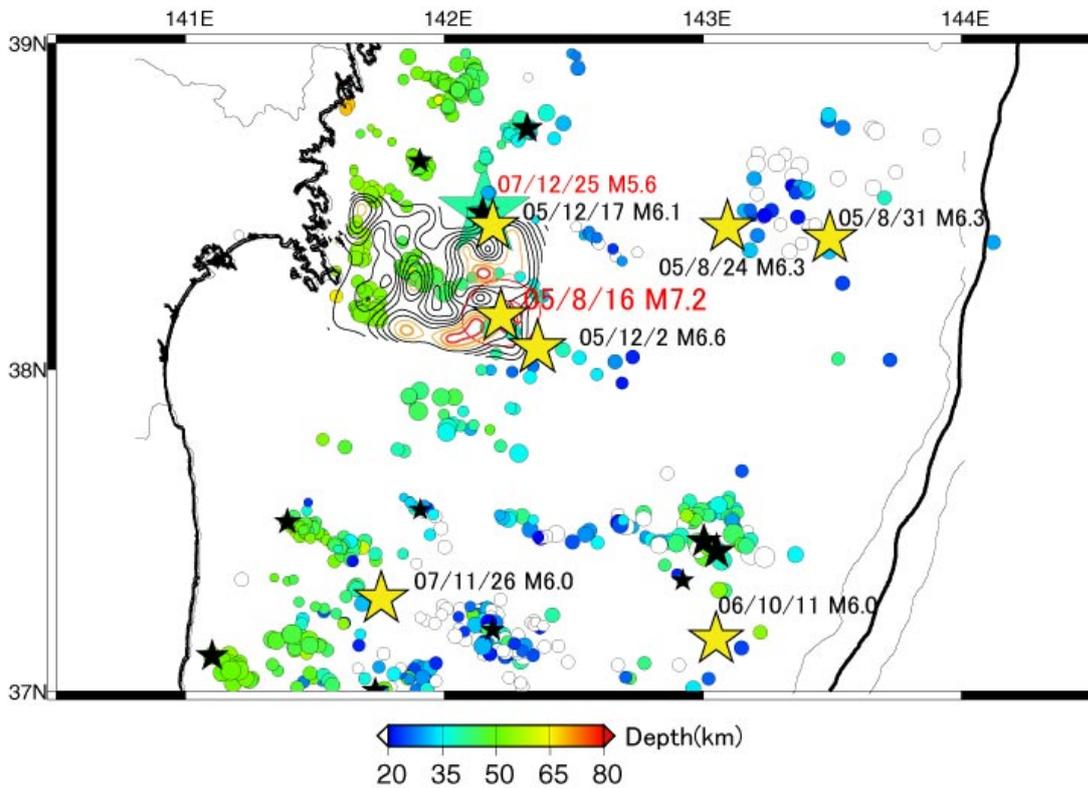


図 27 2007 年 12 月 25 日の宮城県沖の地震 (M5.6) 以降の相似地震活動。2007 年 12 月 25 日から 2008 年 1 月末までに発生したものを黒の星印で、1984 年から 2008 年 1 月までに発生したものを、発生深度に応じた色で塗られた丸印にて示す。黄色の星印は 2005 年 8 月 16 日以降に発生した M6 以上の地震。中央やや左上の等値線群は 1978 年の宮城県沖地震 (M7.4) の破壊域 (Yaginuma et al., 2006)。

(d) 結論ならびに今後の課題

今年度は2005年8月16日に宮城県沖で発生したM7.2の地震の破壊域周辺で発生した地震について、OBSと陸上観測点のデータを併合処理することにより詳細な震源分布、多数の地震の発震機構解、陸域-海域にかけて詳細な地震波速度構造を推定した。発震機構解の空間分布から、プレート境界域で発生する地震活動には、大地震の地震時すべりや余効すべりとの間に時空間的な対応関係が見られることがわかった。こうした対応関係が存在することは、プレート境界域で発生する地震の活動の時空間的な変化を、その発震機構解に注目して解析することによって、プレート間すべりの時空間変化の特徴を抽出することができる可能性を示している。こうした地震活動の解析によりもたらされるすべりの時空間的な変化に関する情報は、プレート境界面における摩擦特性の空間な不均質を理解する上で有用であると考えられる。

速度構造の詳細な解析から、宮城県沖地震の震源域においては、マントルウェッジは低 V_p/V_s を示すことが分かった。このことは、マントルウェッジの水和がこの領域でほとんど起こっていないことを示すものであり、ここでM7級の地震が繰り返し発生することの原因の一つであると考えられる。また、宮城県沖地震の震源域では、海洋性地殻の V_p/V_s が有意に小さい。過去に発生した宮城県沖地震が、そのすべり域は異なっても震源位置が近いことから、局所的に含水量の少ない海洋性地殻が存在し、それが蛇紋岩化していないマントルウェッジと接することで破壊の開始点となりうるのかもしれない。今後、人工地震探査データや、本研究によって得られたプレート境界面などの速度不連続面を仮定した速度構造解析を行うことで、より高分解能の速度構造推定が可能となり、プレート境界域におけるすべり現象の棲み分けの成因に迫ることができると考えられる。

GPSデータに基づくプレート間カップリングの推定ならびに相似地震のモニタリングに関しては、その対象領域を宮城県沖の外へ広げ、宮城県沖以外の領域での現象に起因する、宮城県沖におけるプレート間すべりの推定に際する問題点を排除することに務めた。その過程で見いだされた現象の今後の推移を引き続き注意深く調査することが、今後の最重要課題の一つといえる。

今年度までの調査研究の成果は、陸上のオンライン観測のデータに基づくGPSおよび相似地震解析がプレート間すべり状態を把握するのにきわめて有効であることを示している。したがって、こうした観測データの処理・解析を準実時間化・ルーチン化することは、プレート間すべりの現状を監視する手段として有効であると考えられるため、今後はこうした監視システムを実現するための技術開発を進めていく必要がある。特にGPS時系列データを用いた時間依存逆解析手法に関して、現在使用しているものでは時間方向にプレート間すべりの分布が急変するような場合、その推定が困難になるという欠点をはらんでおり、この点を改良した手法を開発し、実用化することが必要である。

(e) 引用文献

- 1) Yaginuma, T., T. Okada, Y. Yagi, T. Matsuzawa, N. Umino & A. Hasegawa, Co-seismic slip distribution of the 2005 off Miyagi earthquake (M7.2) estimated by inversion of teleseismic and regional seismograms, *Earth Planets Space*, **58**, 1549-1554, 2006.
- 2) 海野徳仁・河野俊夫・岡田知己・中島淳一・松澤暢・内田直希・長谷川昭・田村良明・青木元, 2007, 1930年代に発生したM7クラスの宮城県沖地震の震源再決定-1978年宮城県沖地震のアスペリティでのすべりだったのか?-, *地震*, **2**, **59**, 325-337.
- 3) ト部卓・東田進也, win-微小地震観測網波形検測支援のためのワークステーション・プログラム(強化版), 地震学会講演予稿集, No. 2, 331, 1992.
- 4) Waldhauser, F., & W. L. Ellsworth, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 1353-1368, 2000.
- 5) 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, 2003.
- 6) Yamanaka, Y. & 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) 山本揚二郎, 東北日本前弧域の地震波速度不均質とその地震テクtonics的意義, 東北大学博士論文, 127 pp, 2007.
- 8) Kagan, Y. Y., 3-D rotation of double-couple earthquake source, *Geophys. J. Int.*, **106**, 709-716, 1991.
- 9) Miura, S., T. Iinuma, S. Yui, N. Uchida, T. Sato, K. Tachibana & 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.
- 10) 飯沼卓史・長谷川昭・三浦哲・立花憲司・佐藤俊也, 2005年宮城県沖地震の最大余震(2005年12月2日・M6.6)により励起された可能性のあるプレート間ゆっくり滑り, 日本地球惑星科学連合 2007年大会予稿集, D107-P012, 2007.
- 11) Matsuzawa, T., N. Uchida, T. Igarashi, T. Okada, & A. Hasegawa, Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northern Honshu, Japan, *Earth Planet Sci.*, **56**, 803-811, 2004.
- 12) Zhang, H. & C. H. Thurber, Double-Difference Tomography: the method and its application to the Hayward Fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 1875-1889, 2003.
- 13) Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. Jefferson, M. Watkins & 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.
- 14) Yabuki, T., & M. Matsu'ura, 1992, Geodetic data inversion using a Bayesian information criterion for spatial distribution of fault slip, *Geophys. J. Int.* **109**, 363-375.
- 15) Igarashi, T., T. Matsuzawa, N. Umino, & A. Hasegawa, 2001, Spatial distribution of focal mechanisms for interplate and intraplate earthquakes associated with the subducting Pacific plate beneath the northeastern Japan arc: A triple-plated deep seismic zone, *J. Geophys. Res.*, **106**, 2177-2191.
- 16) Suwa, Y., S. Miura, A. Hasegawa, T. Sato, & K. Tachibana, Interplate coupling beneath NE Japan inferred from three dimensional displacement field, *J. Geophys. Res.*, **111**, B04402, doi:10.1029/2004JB003203, 2006.
- 17) Ellsworth, W. L., Characteristic earthquake & long-term earthquake forecasts: Implications of central California seismicity, in *Urban Disaster Mitigation: The Role of Science and Technology*, edited by F. Y. Cheng & M. S. Sheu, Elsevier, Oxford, 1995.
- 18) Nadeau, R. M., W. Foxall, & T. V. McEvilly, Clustering and periodic recurrence of microearthquake on the San Andreas fault at Parkfield, California, *Science*, **267**, 503-507, 1995.
- 19) Yagi, Y. & 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.

(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
Gamage, S. S. N., N. Umino, A. Hasegawa	Offshore double-planed shallow seismicity in the NE Japan forearc region revealed by seismic waveform characteristics	日本地球惑星科学連合 2007 年大会	2007 年 5 月 19 日
荒尾正克, 松澤暢, 内田直希, 有吉慶介, 長谷川昭	小繰り返し地震波形の各周波数におけるコヒーレンスと再来間隔との関係	日本地球惑星科学連合 2007 年大会	2007 年 5 月 1 日
飯沼卓史, 長谷川昭, 三浦哲,	2005 年宮城県沖地震の最大余震(2005 年 12 月 2 日・	日本地球惑星科学連合 2007 年大会	2007 年 5

立花憲司, 佐藤俊也	M6.6)により励起された可能性のあるプレート間ゆっくり滑り		月1日
柳沼直, 岡田知己, 加藤研一, 武村雅之, 八木勇治, 内田直希, 長谷川昭	2005年宮城県沖地震(M7.2)と1978年宮城県沖地震(M7.4)のアスペリティの比較研究(3)	日本地球惑星科学連合2007年大会	2007年5月1日
鈴木健介, 日野亮太, 山本揚二郎, 金沢敏彦, 山田知朗, 篠原雅尚, 植平賢司, 田中昌之, 金田義行	海底地震観測による2005年宮城県沖の地震(M7.2)の余震分布	日本地球惑星科学連合2007年大会	2007年5月1日
Shantha Gamage, Norihito Umino, Akira Hasegawa	Earthquake generating stress of the offshore double-planed shallow seismic zone in the NE Japan forearc region	日本地震学会2007年秋季大会	2007年10月24日
伊藤喜宏, 山本揚二郎, 鈴木健介, 日野亮太, 松原誠, 小原一成	海底地震観測網による震源との比較に基づく波形・走時ハイブリッドモーメントテンソル解析法の検証	日本地震学会2007年秋季大会	2007年10月1日
荒尾正克, 松澤暢, 内田直希, 有吉慶介, 長谷川昭	プレート境界における非相似地震と相似地震の関係	日本地震学会2007年秋季大会	2007年10月1日
山本揚二郎, 日野亮太, 鈴木健介, 伊藤喜宏, 山田知朗, 篠原雅尚, 金沢敏彦, 田中昌之, 金田義行, 植平	宮城県沖および福島県沖前弧域の地震学的構造	日本地震学会2007年秋季大会	2007年10月1日

賢司			
飯沼卓史, 三浦哲, 内田直希, 佐藤俊也, 立花憲司, 長谷川昭	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 - 2002年から2006年まで-	日本地震学会 2007 年秋季大会	2007年10月1日
鈴木健介, 日野亮太, 山本揚二郎, 伊藤喜宏, 金沢敏彦, 山田知朗, 篠原雅尚, 植平賢司, 田中昌之, 金田義行	放射特性を用いた 2005 年宮城県沖の地震(M 7.2)の余震のメカニズム解分布	日本地震学会 2007 年秋季大会	2007年10月1日
Iinuma, T., A. Hasegawa, S. Miura, N. Uchida, T. Sato, K. Tachibana	Possible slow slip event on the plate interface induced by the largest aftershock of the 2005 Miyagi-oki earthquake	IUGG 2007	2007年7月1日
Yamamoto, Y., R. Hino, K. Suzuki, T. Yamada, M. Shinohara, T. Kanazawa, M. Tanaka, Y. Kaneda, K. Uehira	THREE-DIMENSIONAL SEISMIC VELOCITY STRUCTURE IN THE OFF-MIYAGI AND OFF-FUKUSHIMA FOREARC REGION	EASTEC symposium 2007 Dynamic Earth -its origin and future-	2007年9月1日
Ito Y., Y. Yamamoto, K. Suzuki, R. Hino, M. Matsubara, K. Obara	Performance of the hybrid method for waveform and travel-time analyses based on a comparison with the hypocenters calculated from the ocean-bottom-seismometer	AGU 2007	2007年12月13日

	network		
Suzuki, K., R. Hino, Y. Yamamoto, Y. Ito, T. Kanazawa, T. Yamada, M. Shinohara, K. Uehira, M. Tanaka, Y. Kaneda	Focal mechanism distribution of main- and after- shock of the 2005 off Miyagi Earthquake (M7.2) by using radiation pattern of P- and S- wave	AGU 2007	2007 年 12 月 13 日
Uchida, N., T. Matsuzawa, W. L. Ellsworth, K. Imanishi, T. Okada and A. Hasegawa	Source parameters of a M4.8 and its accompanying repeating earthquakes off Kamaishi, NE Japan - implications for the hierarchical structure of asperities and earthquake cycle	Geophys. Res. Lett. 34, doi:10.1029/2007GL031263	2007 年
日野亮太・鈴木健介・山本揚二郎・西野 実・金沢敏彦・山田知朗・中東和夫・望月公廣・篠原雅尚・桑野亜佐子・青木元・田中昌之・荒木英一 郎・小平秀一・藤江剛・金田義行	海底地震観測による 2005 年宮城県沖地震 (M7.2) の余震分布 (速報)	地震 2	2007 年
三浦 哲・油井智史・飯沼卓史・佐藤俊也・立花憲司・長谷	2005 年宮城県沖地震 (M7.2) に伴った地震時・地震後地殻変動から推定されたプレート境界面上のす	地震 2	2007 年

川 昭	べり分布		
内田直希・松澤暢・三浦 哲・平原 聡・長谷川 昭	小繰り返し地震解析による宮城・福島県沖プレート境界の準静的すべり	地震 2	2007年
有吉慶介・松澤暢・矢部康男・長谷川昭・加藤尚之	沈み込みプレート境界における断層セグメント間の相互作用	地震 2	2007年
海野徳仁・河野俊夫・岡田知己・中島淳一・松澤 暢・内田直希・長 谷川昭・田村良明・青木 元	1930年代に発生した M7クラスの宮城県沖地震の震源再決定－1978年宮城県沖地震のアスペリティでのすべりだったのか？－	地震 2	2007年
河野俊夫・海野徳仁・長谷川昭	1930年代に発生した M7クラスの宮城県沖の地震の震度分布について	地震 2	2007年

(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) 平成 20 年度業務計画案

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、プレート境界面上および面外それぞれにおける地震活動のより詳細な検討を進める。さらにプレート境界付近の応力場をより詳細な発震機構解の空間分布から推定するとともに、それぞれの位置付近における

プレート間すべりとプレート境界近傍の応力場の変化の時空間的対応の抽出に努める。

準静的すべりの時空間発展の準リアルタイム・モニタを実現するために、GPS 観測および相似地震観測データを準リアルタイムで処理するためのシステムの開発と実用化のための改良を継続して進める。本学が宮城県内を中心とした地域で整備しつつある陸上 GPS 観測点のデータと従来の観測点および GEONET のデータとの併合解析を進め、それにより得られる地表の変位速度場を用いた逆解析を高度化する。時間方向での急激な変動があっても推定を精確に行なえる手法の開発・調整を継続し、実用化を目指すとともに、プレート間すべり分布の時空間変化を即時的に検知できるようなシステムの開発及び異常値があった際の判定プロセスの確立を行う。また、リアルタイム収録されている陸上観測網の地震波形データから相似地震を同定し、その位置とすべり量を高精度かつ準リアルタイムで推定するための自動処理手法の開発を継続して行い、プロトタイプ・システムの完成を目指す。