

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

アスペリティの特性解明に向けた観測研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

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

(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

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：

プレート境界におけるすべり現象の多様性の原因が摩擦特性の空間変化にあると仮定し、すべり現象の発生位置とプレート境界周辺の地震学的構造とを詳細に明らかにすることにより、摩擦特性を特徴付ける地下構造パラメータを特定することが、本計画の 5 か年の到達目標である。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度においては、これまでに北海道・東北日本の前弧域において実施された海底地震観測データをコンパイルし、広域にわたるプレート境界面の形状や地震波速度の空間分布を明らかにするとともに、相似地震などの特徴的な地震に特に着目して、震源分布の高精度推定を行う。さらに、北大理・東大震研などと共同して、長期海底微小地震観測を実施し、微小地震の発震機構解に基づく応力状態の推定を行う。また、海洋研究開発機構と共同して、東南海地震震源の海溝側縁辺域において人工地震探査を実施し、固着域浅部限界付近が示す地震学的構造の特徴の解明を試みる。それとともに、プレート境界型地震の発生様式が東北日本弧と類似する日向灘での海底地震観測を実施し、プレート境界地震発生域の応力状態について、東北日本弧との相違点・共通点の解明をめざす。一方で、陸上観測網で得られるデータを用いたプレート間すべり量分布の推定における推定精度向上をめざして、相似地震のスケーリング則の高度化ならびに GPS データを用いたすべり量逆解析手法の高度化を進める。

平成 22 年度においては、北海道・東北日本弧の地震波速度構造・プレート境界面の形状・プレート境界地震震源分布、ならびにプレート間すべり分布の高精度推定を継続して実施し、プレート間固着・すべり状態と地下構造や地震活動の空間的な不均質との対応関係の解明を進める。長期海底微小地震観測を継続して実施して、宮城県沖、釧路・根室沖の海域における応力状態の推定精度の向上を図る。また、従来の人工地震探査データの解析から東北日本および西南日本のプレート境界面近傍の S 波速度構造の推定を試みる。

平成 23～25 年度には、平成 22 年度までの観測研究を継続して実施し、プレート間すべり分布と、地下構造不均質ならびにプレート内応力場の空間変化との対応を明らかにし、固着域の推定精度の向上を図る。また、プレート境界面における多様なすべりイベントの震源位置の高精度推定を進め、上記の結果とあわせることにより、プレート間すべり特性を支配する要因の特定をめざす。

(7) 平成 22 年度成果の概要：

宮城県沖地震の震源域で実施している繰り返し海底地震観測のデータを、陸上観測点のデータと併合してこの海域周辺の地震波速度構造モデルを推定した。自然地震に加え、人工地震探査のデータをあわせた地震波トモグラフィ解析により、地震波速度構造イメージの解像度の改善を試みた。その結果、プレート境界上盤側の高 V_p/V_s 領域と宮城県沖地震アスぺリティとの空間的な相補性がより明瞭に示され、マントルウェッジ内の部分的な含水化が、その直下でのプレート境界における地震性すべりを抑制していることを示唆する(図 1 a)。マントルウェッジ内に見られる微小地震活動域は、高 V_p/V_s に隣接するように分布し、こうした地震活動(Supra-slab 地震)の発生にスラブから剥離・上昇する海山の脱水脆性化が関与しているという仮説を支持する(図 1 b)。さらに、こうした不均質に特徴付けられるマントルウェッジは陸域下のマントルと比べ高速であり、東北日本弧の海岸線付近に明瞭な速度急変帯が存在する(図 1 b)。この急変帯は、マントルウェッジ内の二次対流の海溝側前線に対応し、それより海側のマントルは対流に関与しないために低温が保たれ、その結果地震波速度が高速となるとともに、小スケールの不均質性が維持されていると考えられる。

三陸沖で発生した地震について、陸上観測点データを用いダブル・ディファレンス法により震源再決定を行い、プレート境界に存在すると考えられる小繰り返し地震を基準として前弧域における地震分布を調べた。その結果、上述の宮城県沖での海底地震観測で見いだされたのと同様の、スラブ直上に分布する Supura-slab 地震のクラスターが数多く存在することが示された(図 2)。これらの地震は主に、今回、小繰り返し地震からの変換波から推定した島弧モホよりも深い場所(深さ 25-50km)に分布し、底付け付加が起きていることを示している可能性がある。このような supraslab 地震は、プレート間固着の下限を決める要因として重要と考えられる。

三陸沖で発生した地震について、陸上観測点データを用いダブル・ディファレンス法により震源再決定を行い、プレート境界に存在すると考えられる小繰り返し地震を基準として前弧域における地震分布を調べた。その結果、上述の宮城県沖での海底地震観測で見いだされたのと同様の、スラブ直上に分布する Supura-slab 地震のクラスターが数多く存在することが示された(図 2)。これらの地震は主に、今回、小繰り返し地震からの変換波から推定した島弧モホよりも深い場所(深さ 25-50km)に分布し、底付け付加が起きていることを示している可能性がある。このような supraslab 地震は、プレート間固着の下限を決める要因として重要と考えられる。

また、2005 年宮城県沖地震の発生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、応力場の推定を行った。その結果、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。推定された最大主応力軸の方向は、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。宮城県沖地震の震源域とそれより東側においては、プレート境界面の傾斜角は顕著に異なることが地震探査などから知られ、震源域東側では 20° 以下の低角、震源域周辺では 30° 以上の高角である。すると、震源域内では最大主応力軸がプレート境界面に対してなす角度はその東側領域より大きくなり(図 3)、結果として震源域内での法線応力が相対的に高くなっていると期待される。従って、宮城県沖におけるプレート間固着の空間変化には、上で示したようなマントルウェッジ内の不均質構造とともに、プレート境界面の形状が影響を及ぼしていると考えられる。

一方で、1944 年南海地震の震源域において JAMSTEC との共同により実施した海底掘削孔を用いた地震探査(VSP)のデータ解析を継続して行った。サークルシューティング探査の結果から、サイト周囲で海底下最表層にある海盆堆積層内では、フィリピン海プレートの沈み込む方向に伝播する P 波の速度が最大値を示すような異方性が見られることがわかった(図 4 a)。さらに、S 波の偏光異方性も確認され、速い S 波の振動方向は速い P 波の伝播方向と調和する(図 4 b)。 V_p 最大の方向は、

他の孔内計測から推定された最大圧縮応力軸の方向と良い一致を示し、地震波速度異方性がこの地域の応力状態を反映したものと考察される。さらに、 V_p にみられる異方性の大きさから差応力の大きさを見積もり、海盆堆積層内では、鉛直応力と最大水平応力とが同程度の大きさをもつことが推定された。また、水平動成分記録の処理を進め、P波起源の多重反射波とS波の分別を行い、異方性が検出された海盆堆積物の下位にある固結が進んだ古い付加堆積層内を屈折S波として伝播してきた位相を同定し、層内のポアソン比を高信頼度で推定することに成功した。得られたポアソン比は0.25程度で、過去に足摺沖の付加堆積層内で得られている値と比べて顕著に小さく、熊野灘におけるこの層内での透水率が低いことを示唆する。熊野灘では、足摺沖に比べて、分岐断層における低周波地震の活動度が高いことから、透水性の低い付加堆積層がその下側にある分岐断層帯における間隙水圧を上昇させ、その結果として、低周波地震の活動度が高まっている可能性がある。

GPS観測から得られる変位速度場の空間勾配に基づいて、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・公開している日々の座標値(F3解)を基に、各観測点の日座標値時系列から変位速度の推定し、プレート収束方向に伸びた幅60kmの帯状領域内の観測点での推定値から、水平及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50km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大陸側へ変位)を持つようになり、固着が弱いと勾配は0に近くなる。一方、余効すべりなどのプレート間すべりの加速があると、勾配は正(太平洋側の観測点ほど大きく海側へ変位)になる。上下変位勾配は深部での固着があるとき負(太平洋側の観測点ほど大きく沈降)、固着が小さければ正(太平洋側の観測点ほど大きく隆起)となる。

2002年以前の5年間に注目すると(図5)、福島県中南部・宮城県北部・青森県南部を通る測線において水平変位勾配が極小値をとる。これらの領域には1938年塩屋崎沖地震・1978年宮城県沖地震・1968年十勝沖地震などの大地震の破壊域が存在し、地震間には強く固着していることと対応している。また、上下変位勾配は宮城県沖地震の破壊域周辺を通る測線で負値となり、陸域下深部プレート表面での固着の存在を示唆している。この期間で見ると、2003年十勝沖地震や1973年根室沖地震の破壊域を通る測線において水平変位勾配が大きな負値をとり、強い地震間のプレート間固着を反映している。図5では北海道における上下変位勾配は概して負であるが、十勝沖地震後の期間では正に転じており、深部での固着が消失したことを示す。

小繰り返し地震のモニタリングを継続するとともに、新たに中規模の繰り返し地震のモニタリングのための準備に取り掛かった。その結果、地震のサイズに応じた周波数帯域での解析により、多くの中規模繰り返し地震が抽出できることが分かった。今後これらの幅広い規模の繰り返し地震の解析により、プレート境界すべりを推定するためのスケールリング則の高度化に役立てられると考えられる。
====平成23年度の成果====

「課題番号：9100」

従来、日本海溝陸側斜面下では、M7.8程度の地震に対応する離散的なアスペリティ分布が推定されていて、それと地下構造との関連からアスペリティの実体に関する研究が進められてきた。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震時には海陸プレート境界のきわめて広い範囲で大きなすべりを示していて、これまでの「非アスペリティ」とされてきた領域の摩擦特性が注目されるようになってきた。そこで、本課題では日本海溝陸側斜面下の地下構造と今回の地震の震源位置や地震時すべり量分布との関係について研究を進めている。

図6は課題番号1202で実施されてきた宮城県沖における海底地震観測のデータを用いて再決定された3月9日の前震から3月11日の本震までの期間に発生した地震の震源分布と、こうした地震活動がみられた宮城県沖における人工地震探査で得られたP波速度分布との比較である。前震とその余震活動の中心は沈み込む太平洋プレートと上盤(東北日本弧)側の地殻とが接しているプレート境界面で発生していたことがわかる。さらに、本震の震源(破壊の開始点)付近を境に、プレート境界の上盤側の物質が地殻(海溝側)からマントル(内陸側)に変化している。ここでは、プレート境界面の傾斜角度も急変しており、こうした構造の不連続的な変化点と破壊の開始点が一致しているのは興味深

い観測事実である。前震活動の範囲は海溝側に明瞭なカット・オフを示しており、海溝軸のすぐ陸側の 30 km 程度の幅の領域はほとんど微小地震活動が見られないが、この領域では上盤側の P 波速度が極端に小さい。この領域は海底地殻変動観測などから非常に大きな地震時すべりがあったと推定される範囲（課題番号 1202）とほぼ一致しており、低 P 波速度を示す未固結堆積物の存在が、本震発生までは非地震的でありながら地震時に大きなすべりを伴うという、この領域のプレート境界面の摩擦特性と深い関係にあることを示唆する。

東北地方太平洋側の海域下の地震波速度構造が示す広域・長波長の不均質は、陸上観測網で検測される P・S 波の他、depth phase の一種である sP 波の走時を合わせたトモグラフィ解析により推定されている。その結果は、この領域では明瞭な南北方向の構造不均質があり、宮城県沖を中心に高速度異常域が見られるのに対して、その南北の岩手県沖および福島県沖では低速度異常が見られる（図 7）。この分布を東北地方太平洋沖地震のすべり分布と比較すると、すべり量が特に大きい範囲が高速度異常域の広がりとはほぼ一致しており、今回の巨大地震においても、構造不均質に起因する摩擦特性の変化がすべり過程を制約している可能性が指摘できる。また、大きな地震時すべりは震央位置よりも海溝側にあつて、図 6 の構造断面とあわせて考えると、今回の地震のすべり量は、スラブ - 前弧マントル接触域に比べて、スラブ - 地殻接触域において特に大きかった可能性が高い。

本課題の平成 22 年度の成果として（上述）、前弧マントル内の不均質構造と宮城県沖地震のすべり量の範囲との間の対応関係を指摘した。東北地方太平洋沖地震のすべり分布は、スラブ - マントル接触域においては、宮城県沖地震の震源の範囲に極大をもつように見え、その範囲では高 P 波速度、高 S 波速度、低 V_p/V_s 比（図 8）という特徴を示す。従って、今回の地震も、宮城県地震の破壊と同様に、前弧マントル内の不均質構造の影響をうけたすべり分布となっている可能性が指摘できる。

また、本課題では、東北地方太平洋沖地震の余効変動の観測強化を図るために、海底地殻変動観測の強化を図っている。具体的には、GPS/音響結合（GPS/A）方式海底地殻変動観測の観測頻度の向上と、海底圧力観測網の増強である。GPS/A 方式海底地殻変動観測については、地震直後（4 月）に大きな変位を観測した宮城県沖の観測点において 5 月（実施済み）、7 月（現在観測準備中）、10 月（予定）、11 月（予定）に再測量を実施するほか、福島県沖と日本海溝海側斜面（宮城県沖の東側）に新規観測点の増設した。海底圧力観測については、宮城県沖の観測網の増強と本震破壊域の北側延長の岩手～青森県沖の海溝軸近くに観測点を増設した。

- (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）：
Hino, R., N. L. Bangs, Y. Sanada, J-O. Park, R. von Huene, G. F. Moore, T. Tsuji, Araki, and M. Kinoshita, 2010, S-wave velocity structure in the accretional prism beneath the Kumano Basin, Nankai Trough, Japan, revealed by vertical seismic profiling, Abstract U42A-05 presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif.
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, pp.77-78, 講演番号 38.
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・山本揚二郎・金田義行, 2010, 宮城県沖における応力場とプレート間固着強度の関係, 日本地震学会講演予稿集, B31-09.
Tsuji, T., R. Hino, Y. Sanada, J-O. Park, T. No, E. Araki, M. Kinoshita, N. L. Bangs, R. von Huene, and G. F. Moore, 2010, Seismic anisotropy from walk-around VSP data in the Kumano basin south of Kii Peninsula (IODP C0009A), Abstract T23E-02 presented at 2010 Fall Meeting AGU, San Francisco, Calif.
Uchida, N., S. H. Kirby, T. Okada, R. Hino, and A. Hasegawa, 2010, Supraslab earthquake clusters above the subduction plate boundary offshore Sanriku, NE Japan: Seismogenesis in a graveyard of detached seamounts?, J. Geophys. Res., 115, doi:10.1029/2009JB00679.

- (9) 平成 23 年度実施計画の概要：

平成 22 年度から継続して、これまでに北海道・東北日本の前弧域において実施された海底地震観測データをコンパイルし、広域にわたるプレート境界面の形状や地震波速度の空間分布を明らかにするとともに、相似地震などの特徴的な地震に特に着目して、震源分布の高精度推定を行う。さらに、北大理・東大震研などと共同して、長期海底微小地震観測を実施し、微小地震の発震機構解に基づく応力状態の推定を行う。また、海洋研究開発機構と共同して、東南海地震震源の海溝側縁辺域において人工地震探査を実施し、固着域浅部限界付近が示す地震学的構造の特徴の解明を試みる。それとともに、プレート境界型地震の発生様式が東北日本弧と類似する日向灘での海底地震観測を実施し、プレート境界地震発生域の応力状態について、東北日本弧との相違点・共通点の解明をめざす。一方で、陸上観測網で得られるデータを用いたプレート間すべり量分布の推定における推定精度向上をめざして、相似地震のスケーリング則の高度化ならびに GPS データを用いたすべり量逆解析手法の高度化を進める。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

日野亮太・藤本博巳・松澤暢・三浦哲・伊藤喜宏・内田直希・他

他機関との共同研究の有無 : 有

北大理 (村井芳夫 , 3 名程度) , 東大震研 (篠原雅尚 , 5 名程度) , 千葉大理 (佐藤利典 , 2 名程度) ・
九大理 (植平賢司 , 3 名程度) ・海洋研究開発機構 (小平秀一 , 5 名程度)

(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

電話 : 022-795-3916

FAX : 022-264-3292

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

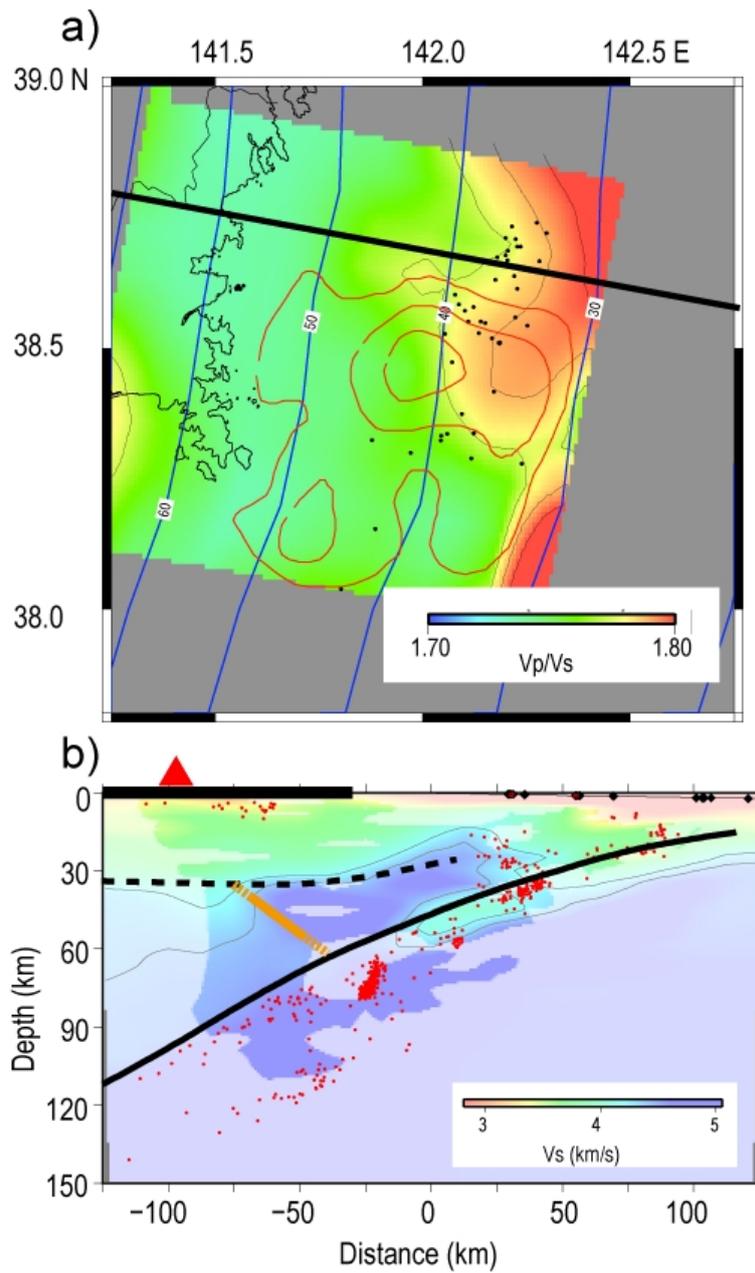


図 1

a) 宮城県沖地震震源域周辺におけるマンテルウェッジ内の V_p/V_s 分布。プレート境界から 5km 以上浅部に震源を持つ地震の震央を黒点で示す。赤色コンターは Yamanaka and Kikuchi (2004) による 1978 年宮城県沖地震のすべり量分布。b) 宮城県沖北部における S 波速度分布を示す鉛直断面。橙色線でマンテルウェッジ内の速度急変帯の位置を示す。赤色点は速度構造とともに推定された震源深さ分布。

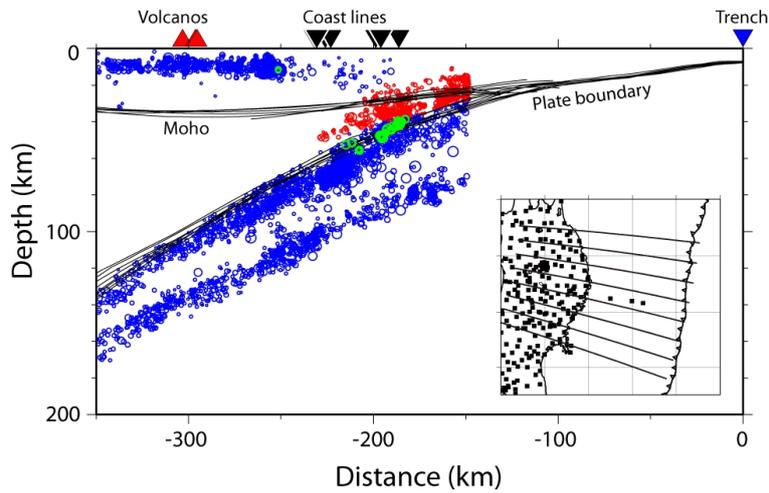


図 2

ダブル・ディファレンス法による東北地方北部前弧域周辺における震源深さ分布．右下の地図中に示された位置にある鉛直断面に投影したものを重ね合わせて表示している．実線と逆三角形は，各断面におけるモホ面およびプレート境界面（Zhao et al., 1997）と，海岸線の位置を示す．プレート境界面より 5-25 km 浅い場所に分布する地震を Supura-slab 地震と定義した（赤）．緑色は波形相関処理により同定された小繰り返し地震であり，プレート境界面に沿って分布する．

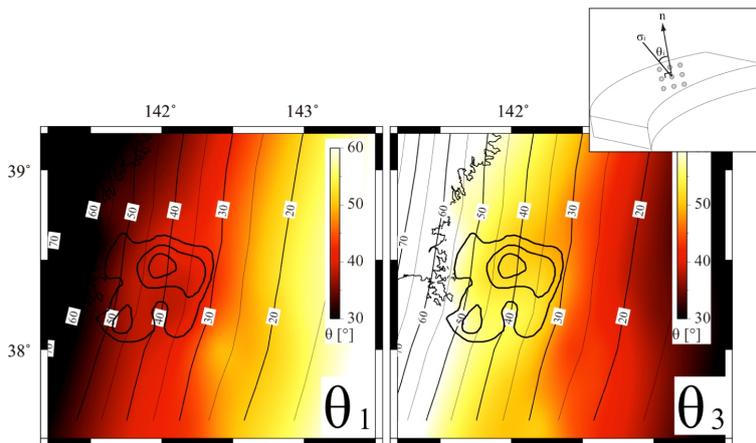


図 3

宮城県沖における最大主応力軸（ θ_1 ）と最小主応力軸（ θ_3 ）がプレート境界面となす角度 θ_1 および θ_3 の空間分布．Yamanaka and Kikuchi (2004) による 1978 年宮城県沖地震のすべり分布とプレート境界面の等深線（山本・他 2009）をあわせて示す．右上に角度の測り方を示す．

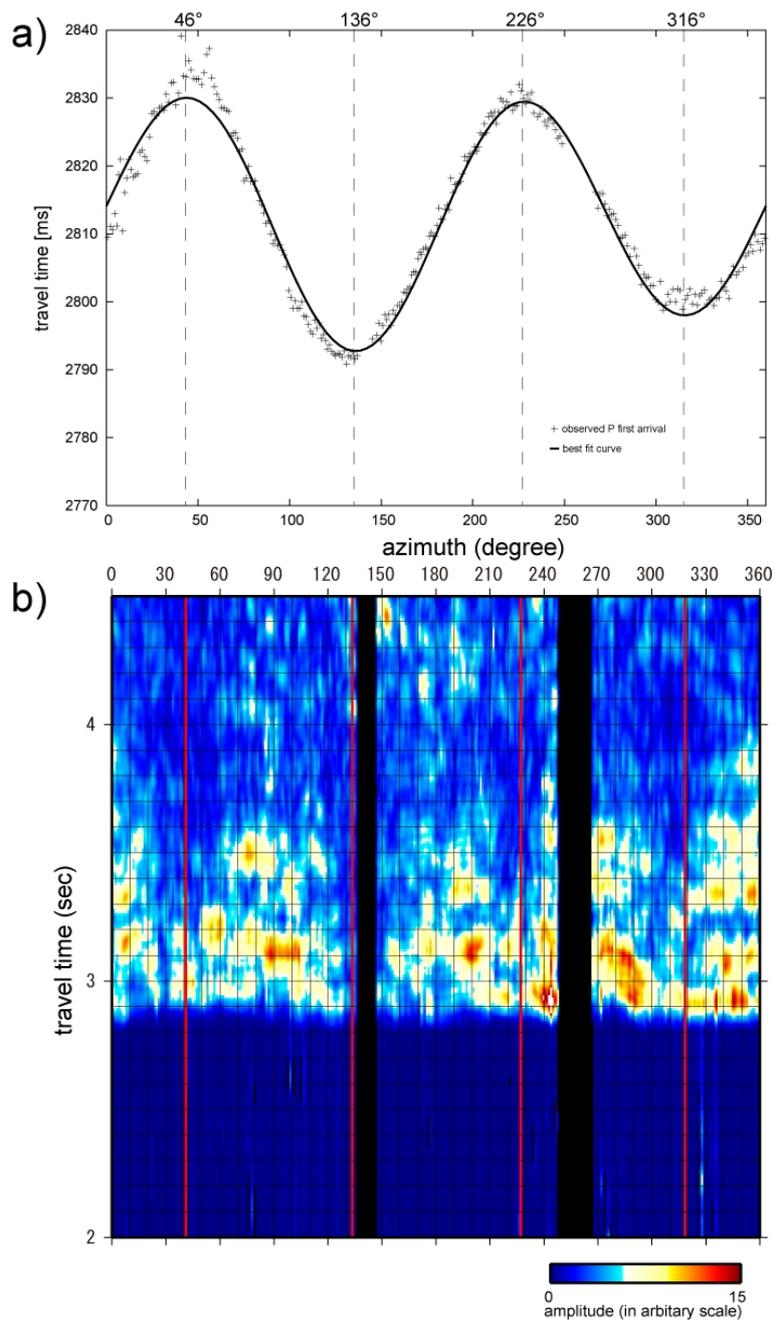


図 4

a) 南海トラフ熊野灘で行った VSP で観測された P 波走時の方位依存性．136 °および 316 °の方位に伝搬する P 波の走時が最小となり，この方向に最大の伝播速度をもつことがわかる．b) transverse 成分の振幅の方位依存性．S 波の偏光異方性の影響により，最大/最小の伝播速度をもつ S 波の振動方向と伝播方向が一致すると，transverse 成分の振幅が小さくなる (van Doc et al., 2003) ．振幅が最小となる方位は， V_p の最大/最小の方位と良い一致を示す．

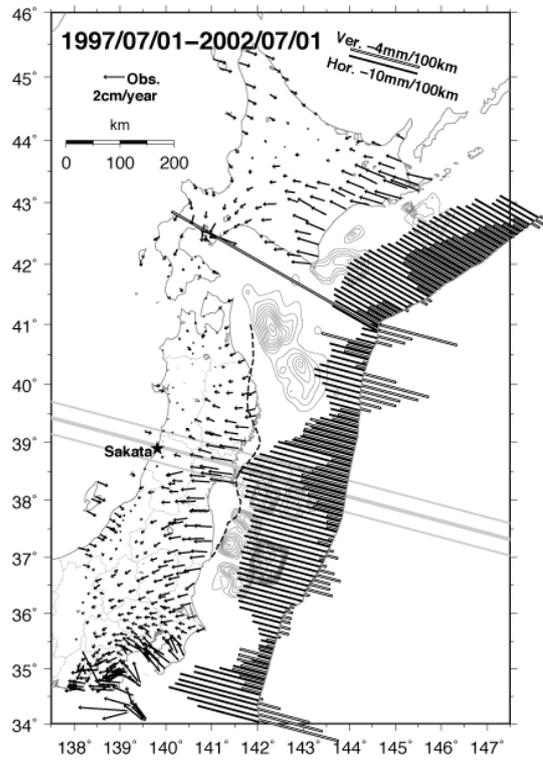


図 5

2002年7月1日から過去5年間の変位速度場から推定された変位勾配の分布。各領域の中心線と海溝軸の交点を原点とした棒の長さで変位勾配の大きさを表す。棒が海溝より海側に伸びていると正の勾配、陸側に伸びていると負の勾配を示す。黒棒と白抜き棒で、水平成分と上下成分のそれぞれを示す。スケールは図中右上に示した。灰色の太い実線で北緯38.9度、東経140度を通る測線の中心を示す。そこから±30kmの範囲(細い灰色の実線)にある観測点のデータを用いて対応する測線の変位速度空間勾配を求めた。

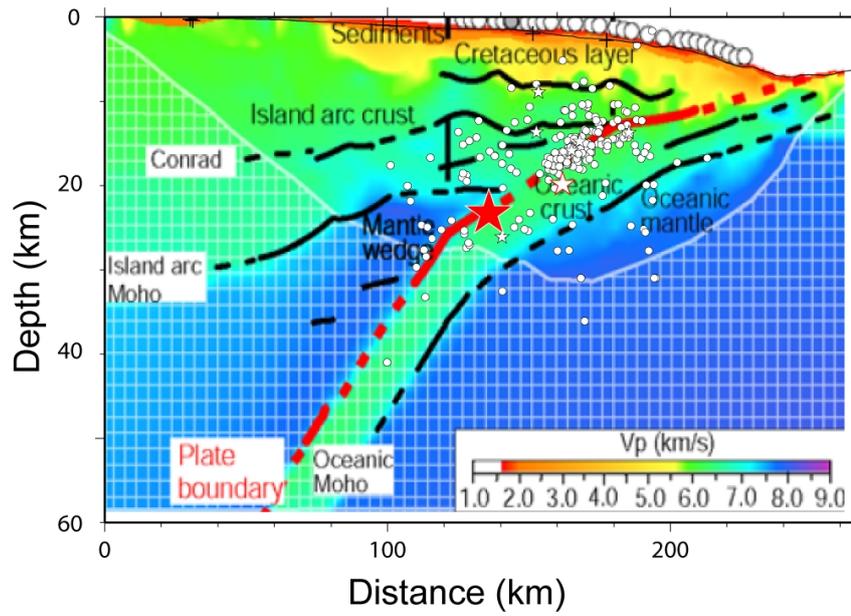


図 6

海底地震計のデータを用いて再決定した 3 月 9 日の前震 (白星) とその余震 (白丸) および 3 月 11 日の本震 (赤星) の震源深さ分布。背景は人工地震探査による前震 - 本震活動域における 2 次元 P 波速度構造モデル (Ito et al., GRL, 2004)。

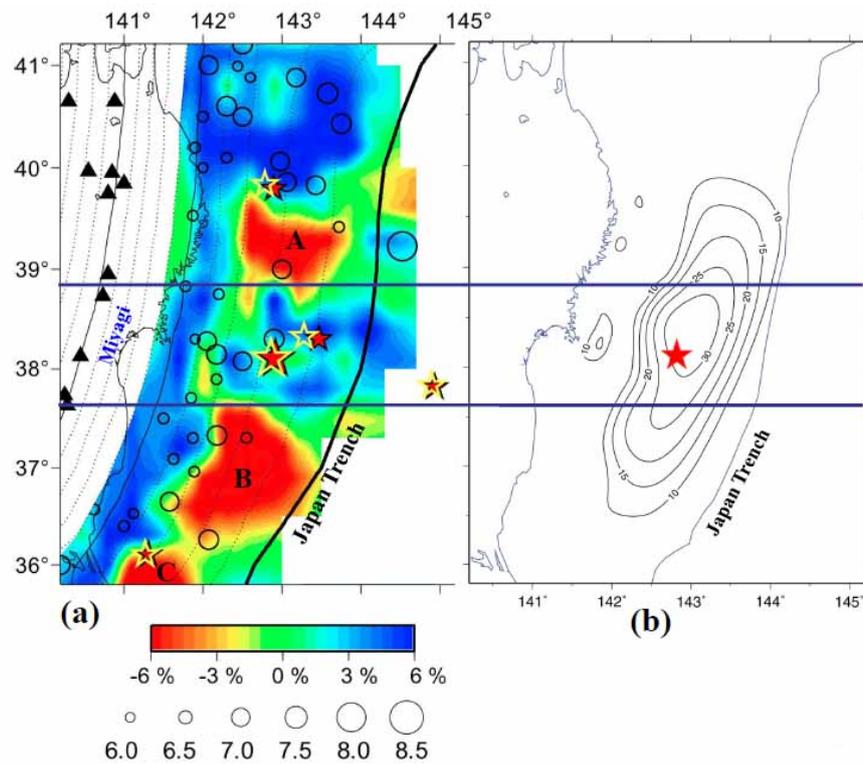


図 7

(a) 東北地方太平洋側のプレート境界面直上における P 波速度異常の分布．A, B, C に顕著な低速度異常が認められる． \circ は 1900～2008 年に発生した M6 以上の地震の震央．星印は前震，本震と 3 月 11 日に発生した大きな余震の震央で赤が再決定したもの，黄色は気象庁によるもの．(b) 本震時のすべり量分布（内田・飯沼，2011）．星印は本震の震央．

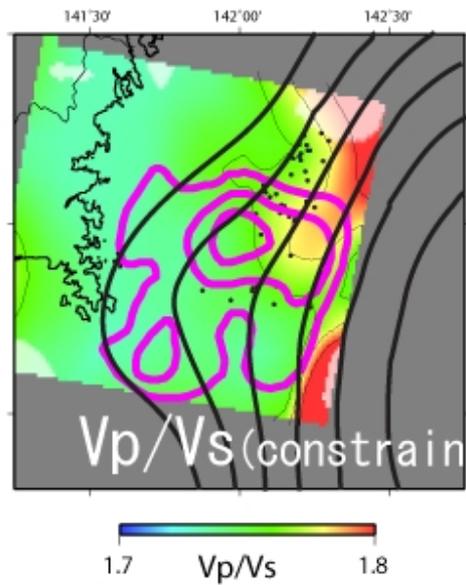


図 8

宮城県沖のプレート境界面直上における V_p/V_s 比の空間分布．コンターは Ozawa et al. (Nature, 2011) による東北地方太平洋沖地震のすべり量分布（4 m 間隔）．