

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

スラブ内地震とプレート境界地震の相互作用 A: 海域観測より明らかにするプレート境界地震との連動性 B: 関東下におけるフィリピン海プレートと太平洋プレートの相互作用による内部変形が及ぼす影響

(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

エ．スラブ内地震の発生機構

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

ア．アスペリティの実体

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

A: 紀伊半島沖南海トラフでは 5 か年度に渡って、また日本海溝沿いでは単年度ごとに場所を移動しつつ根室沖から房総沖に至るまでの海域を網羅するように、長期観測型海底地震計を用いた地震観測を行ってきた。これによって、海域下の地震活動の詳細を知る事が可能となった。本研究ではここで得られたデータを用いて、スラブ内地震について精度の高い震源決定を行う。また陸上地震観測網のデータとあわせてトモグラフィー解析を行う事によって、沈み込むスラブから島弧下の構造まで、その不均質性を詳細に求める。ここで得られた地震活動と構造不均質をあわせて検討し、スラブ内地震の発生メカニズム解明に資する。

B: フィリピン海プレートと太平洋プレートとが接しているフィリピン海プレートの北東縁部で、二つのスラブが衝突することによってフィリピン海スラブ内で変形が進行して、内部変形が、スラブ内地震発生の準備過程を促進・抑制しているという仮説（スラブ内変形仮説）を提案して、この仮説を検証する研究を行う。このために、プレート内の速度（ V_p , V_s ）・ Q の分布、震源分布、発震機構分布を空間的に高分解能で調べる。本研究地域は、「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」で平成 22 年度までに稠密地震観測網（MeSO-net）が整備されるので、そのデータを用いて、空間分解能 5km 程度の 3 次元速度分布が得られる。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

A:

平成 21 年度：紀伊半島沖南海トラフ沿いで長期観測型海底地震計を最大 32 台用いて平成 15 年から 5 か年度に渡って行った繰り返し地震観測の記録について、観測された地震の震源を精度良く決定す

る。気象庁一元化震源リストに記載されている地震については、陸上観測点の検測値を含めた解析を行うことによって、震源と同時に南海トラフ軸から紀伊半島下の陸域を含めた領域における地震波速度構造も精度良く求める。ここで決定された地震について、その震源メカニズムを決定する。一方房総沖において、長期観測型海底地震計 40 台を用いた 1 年間地震観測を始める。

平成 22 年度：紀伊半島沖南海トラフ沿いで行った 5 か年の海域観測点のみで観測された微小地震について、前年度までに決定された地震波速度構造を用いて精度の高い震源を求める。また、これらのうち可能なものについては、震源メカニズムを決定する。房総沖においては、研究課題「アスペリティの実体解明」から、制御震源を用いた構造調査を行う。平成 21 年度に設置した海底地震計 40 台の回収を行い、観測された地震の震源決定および地震波速度構造トモグラフィー解析を始める。

平成 23 年度：紀伊半島沖で観測された地震について、前年度までに決定された震源、地震波速度構造および震源メカニズムをあわせて、スラブ内地震の発生メカニズムについて検討を行う。房総沖で観測された地震については、引き続き震源決定および地震波速度構造トモグラフィー解析を進める。また、震源メカニズムの決定も行う。

平成 24 年度：紀伊半島沖及び房総沖で観測された地震について、震源、地震波速度構造及び震源メカニズム、さらに、制御震源地震波速度構造調査の結果をあわせて、スラブ内地震の発生メカニズムについて検討を行う。これまでに紀伊半島沖南海トラフや日本海溝沿いの海域で行われてきた長期地震観測との連携を考慮し、研究課題「アスペリティの実体解明」から、制御震源を用いた構造調査を行う。

平成 25 年度：紀伊半島沖および房総沖で観測された地震について、スラブ内地震の発生メカニズムについて考察を行い、ここまでの研究をまとめる。平成 24 年度に行った構造調査の結果と、これまでの長期海域地震観測との結果をあわせて、考察を行う。

B:

平成 21 年度：平成 20 年度までに完成する MeSo-net 観測点（178 点）のデータを用いて得られる房総半島下の 2 次元速度断面から、フィリピン海スラブ内の速度分布の特徴を抽出する。スラブ内変形仮説を具体的に提案する。関連の研究者とのワークショップを開く。

平成 22 年度：平成 21 年度までに完成する MeSo-net 観測点（約 300 点）のデータを用いて得られる関東下の 2 次元速度断面から、フィリピン海スラブ内の速度分布の特徴を抽出して、スラブ内変形の実体を解明する。スラブ内変形仮説を修正する。

平成 23 年度：平成 22 年度までに、MeSO-net が完成し、約 400 観測点のデータが使える。関東全域の高分解法 3 次元速度分布・Q 分布を明らかにして、関東の下の方のフィリピン海スラブ内の速度分布、スラブ内変形の実体を解明する。新しいデータに基づいて、スラブ内変形仮説の再提案。この新しい仮説によって、観測される速度・Q 分布が説明できるか検討する。

平成 24 年度：関東の 3 次元速度分布と、Q 分布から、スラブ内の「弱面」を推定する。このために、速度・Q と破壊強度の関係を解明する研究グループとの共同研究をすすめる。スラブ内変形仮説と、「弱面」が整合的であるか検討する。

平成 25 年度：スラブ内の強度分布並びに流体の供給・輸送過程を明らかにし、スラブ内地震の発生に至る過程を解明して、スラブ内変形仮説に基づく物理モデルを作成する。

（ 7 ）計画期間中（平成 21 年度～25 年度）の成果の概要：

A:海域観測より明らかにするプレート境界地震との連動性

平成 15 年度から 19 年度にかけて東京大学地震研究所で開発された長期観測型海底地震計最大 27 台（32 観測点）を用いて紀伊半島沖東南海・南海地震震源域境界周辺において繰り返し海域地震観測を行った。本観測で得られた海底地震観測データに加えて、観測海域周囲に位置する陸上地震観測点の観測データを用いて解析を行った（図 1）。この観測網内で発生した地震について、P 波および S 波の到達時刻検測値を用いた震源および 3 次元地震波速度構造の同時インバージョン解析を行い、精度の高い震源と P 波および S 波の 3 次元速度構造を求めた（図 2）。この時に、震源の相対位置決定精度の向上を目的として、地震間の相対走時計測精度を良くするために、観測波形について相互相関解析

を適用した。海底地震計の観測波形は、海底における設置状況や海底下の厚い堆積層の影響によって単調な雑音が卓越することが多く、特に海底地震計観測網でのみ観測されるような微小地震では、地震波到達時刻周辺における相互相関係数が一様に大きくなることが頻繁に発生した。この問題について、観測波形からの波形切り出し時間を変化させて波形相関を複数回計算することによって計測誤差が大きい走時を同定し、誤差の大きい走時はデータから除外する手法を適用した。ここで決定された地震のうち、およそ 80% がスラブ内で発生していることがわかった。これらのスラブ内地震では、潮岬沖南海トラフ軸から紀伊半島南西部を結ぶ直線を境界として、地殻内で発生している領域とマントル最上部で発生している領域が明瞭に区別されている（図 2）。さらに、マントル最上部で発生している地震について、明瞭に直線的分布が確認できる（図 3）。その配列は、フィリピン海プレート形成時の拡大軸方位とほぼ一致し、形成過程で生じた構造に依存していると考えられる。一方、震源分布境界の東側に位置する地殻内で発生する地震では、数十キロメートル程度の規模のクラスターの発生をしていることがわかった（図 4）。ここで得られた 3 次元地震波速度構造を見ると、震源分布境界の東側では、地殻内の V_p/V_s が低いことが明らかとなった（図 5）。この低 V_p/V_s 領域のすぐ東側には、上盤側プレート最下部で高 V_p/V_s 物質が存在することが明らかとなり、電磁気観測の結果と整合的であることから、流体が多く存在すると考えられることを示した。この領域のプレート境界では低周波地震が発生しておらず、プレート境界における間隙流体圧が高くなっており、安定滑りを起こしているとするモデルを提案した。これらの流体の分布は、沈み込むフィリピン海プレート内での脱水反応と関連していると考えられる（図 6）。また、この 3 次元地震波速度構造を参照して、P 波初動の押し引き分布から震源メカニズムを決定した。その結果、震源メカニズム解の主応力軸が、およそ 30 度回転していることが分かった（図 7）。また、マントル最上部に見られる直線的に配列している地震クラスターの震源メカニズムが横ずれ断層型であり、その震源分布、応力軸方向と広域応力場と整合的であることが明らかとなった。平成 25 年度には、これらの構造不均質等を踏まえ、海底地震計波形データを用いたレシーバー関数解析をはじめている。海底地震計波形データでは特に水平動成分に雑音が大きく、また単調な雑音が卓越することを考慮したレシーバー関数解析手法の開発を行い、実際のデータに適用した。自己浮上式の海底地震計では、海底における水平動成分の方位が既知ではない。ここでは近地地震の到来方向から、水平動の方位の決定を行った。現在までに、陸側プレートの堆積層最下部、および沈み込むフィリピン海プレートのモホ面に対応する構造の同定の可能性が確認された（図 8）。

一方房総沖では、平成 21 年 7 月から 8 月にかけて行われた白鳳丸航海で 1 年間の長期海域観測を目的に 40 台の海底地震計を設置した。平成 22 年 10 月に行った本計画による備船を用いた航海で、これら 40 台を回収すると同時に、これより北に位置する茨城沖海域にて 1 年間の長期海域地震観測のための海底地震計 24 台を設置した。平成 23 年 2 月にはさらに 10 台を加え、34 台の観測アレイとした。茨城沖海域ではこれまでの地震波構造調査から、深さ 10 km に沈み込む太平洋プレート上に富士山級の規模の海山が存在することが明らかにされている（Mochizuki et al., 2008）。本観測アレイでは、観測点間隔 ~ 6 km と通常の海底地震観測と比較して 4 分の 1 程度で地震計を設置し、震源を高精度で決めるとともに、沈み込み構造との詳細な対比から構造と地震活動との関係を詳細に議論することを目的とした。平成 23 年 9 月までに、アレイ観測点 34 台中 31 台の回収を行った。房総沖観測網については、日本海溝軸より海側に設置した海底地震計の観測記録を用いて、精度の高い震源決定を行った。震源・3 次元速度構造の同時インバージョン解析により、沈み込む太平洋プレートが標準的な海洋地殻に準ずる構造をもち、震源は気象庁一元化震源と比較して 50 km 程度浅く陸側に求まり、沈み込む太平洋プレートの沈み込みに沿って地殻及びマントル最上部に集中的に発生して二重地震面上に分布していることが明らかとなった。また茨城沖アレイの観測期間中には 2011 年東北地方太平洋沖地震が発生し、本震前、本震および本震後の記録を得ることができた。陸上地震観測網や地殻変動解析から得られた本震断層滑り量分布によると、本観測アレイは本震断層域の南端部に、さらに本震発生から 30 分後に発生した最大余震震源域の東端に位置している（図 9）。平成 25 年度には、本震直後から最大余震、さらに最大余震後の地震活動およびその分布について、バックプロジェクション法によって解

析を行った。その結果、本震発生直後から最大余震までの30分よりも、最大余震発生直後に本震南端部での活動が活発になり、またそれらの震源は最大余震滑り域の浅部に位置する、沈み込んでいる海山の前縁部に集中して発生していることがわかった(図10)。茨城沖海域は通常地震活動は活発ではないが、これらの地震の多くが沈み込む太平洋プレート内で発生していることがわかった。

B:関東下におけるフィリピン海プレートと太平洋プレートの相互作用による内部変形が及ぼす影響

平成19年度から開始した文部科学省委託研究事業「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」によって、平成20年度には178点、平成21年度までに226点、平成22年度に249点、平成23年度に296点と観測点を増やし、首都圏地域に稠密地震観測網(MeSo-net)が構築された。このMeSo-net観測点に加えて周囲の観測網のデータと統合して震源決定を行い、さらにトモグラフィー解析によって関東下の地震波速度構造を求めた。MeSo-netの観測点間隔は2~3kmで、これまでの観測網と比較して格段に狭いため、トモグラフィー解析で得られる速度構造の解像度が飛躍的に向上している。その結果、沈み込むフィリピン海プレートの海洋性地殻が高 V_p/V_s 領域として明確となり、その上部プレート境界面の位置をより高精度に求めることができた。東京湾北部付近下で従来のプレート境界モデルよりも約10km浅いことが確認された。こうした情報は、首都圏で発生する地震による地震動の想定を行う際に、重要な情報となる。またフィリピン海プレートと太平洋プレートが接している部分の直上も高 V_p/V_s 領域となっており、その境界部分に横ずれ型メカニズムをもつスラブ内地震が分布していることがわかった。さらに観測波形のスペクトルから求められる傾きから観測点ごとの t^* を求め、その t^* を用いた減衰構造のトモグラフィー解析を行った。関東下に沈み込むフィリピン海プレートに起因すると考えられる減衰域が見られ、特に千葉県中部の下では顕著な減衰域が存在する。この部分はフィリピン海プレート下面が太平洋プレートと接している部分で、上述の高 V_p/V_s 領域と一致している。首都圏のような人工的な雑音が大きく、地震観測に不向きと言われていた地域でも、十分な解像度を持って構造が把握できることが示された。

(8)平成25年度の成果に関連の深いもので、平成25年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

(9)実施機関の参加者氏名または部署等名：

A: 望月公廣・篠原雅尚・山田知朗・金澤敏彦

B: 平田直・佐藤比呂志・酒井慎一・他11名

他機関との共同研究の有無：有

(防災科学技術研究所、神奈川県温泉地学研究所、地震研共同利用による公募)

(10)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：東京大学地震研究所 地震予知研究推進センター

電話：03-5841-5712

e-mail：yotik@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/index-j.html

(11)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：望月公廣

所属：東京大学地震研究所 地震地殻変動観測センター

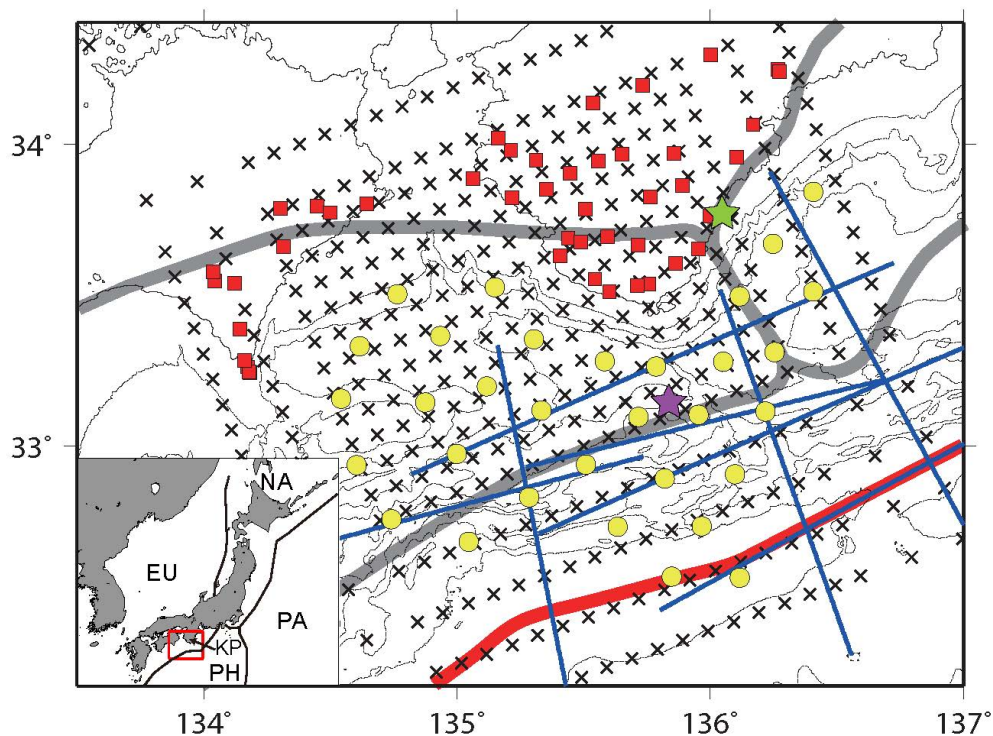


図1 紀伊半島沖東南海・南海地震震源域境界周辺における海陸統合地震観測網の観測点分布

黄○は解析に用いた海底地震観測点を，赤■は陸域観測点を示す．黒×は震源・3次元速度構造同時インバージョン解析におけるグリッド分布を表す．青実線はすでに行われた海域構造調査の測線，赤実線は南海トラフ軸，灰色線は東南海・南海地震想定震源域，緑および紫の星印は1944年東南海地震および1946年南海地震の震央を表す．

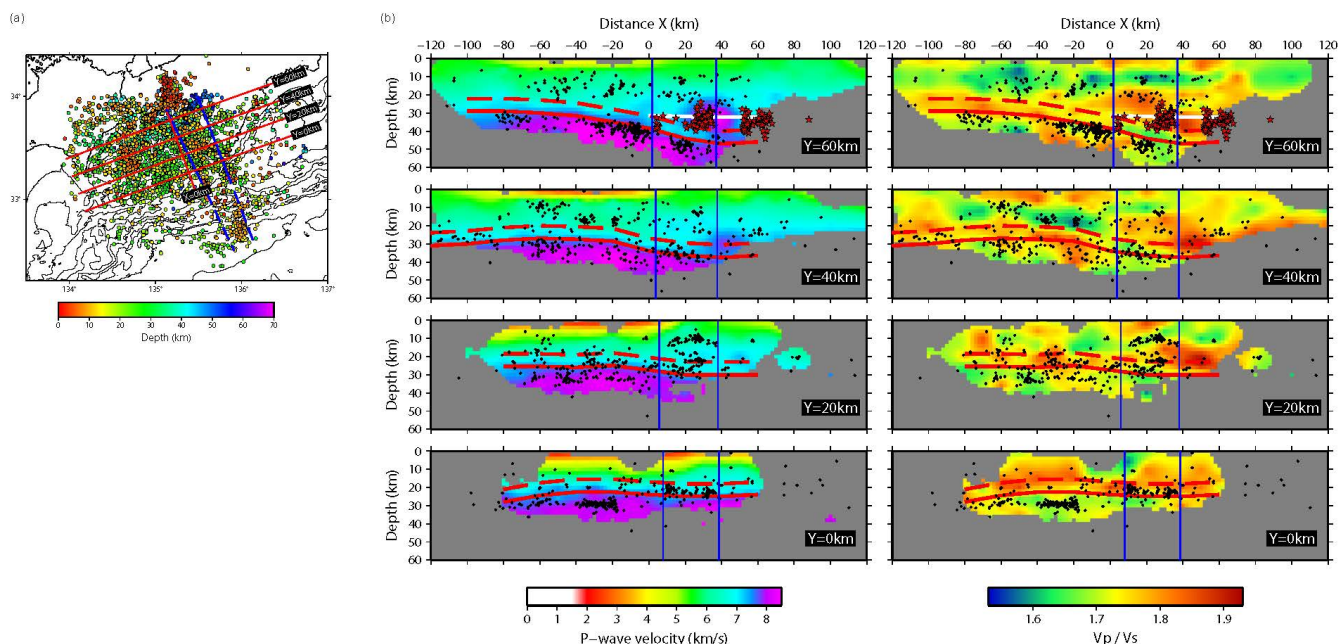


図2 本研究で得られた震源分布と3次元地震波速度構造

左図は本研究で得られた震源分布を表す．また赤実線は中および右図で示す構造断面図の位置を表す．中図はP波速度構造を右図はVp/Vs分布を表し，図中の黒点は震源を投影したものである．

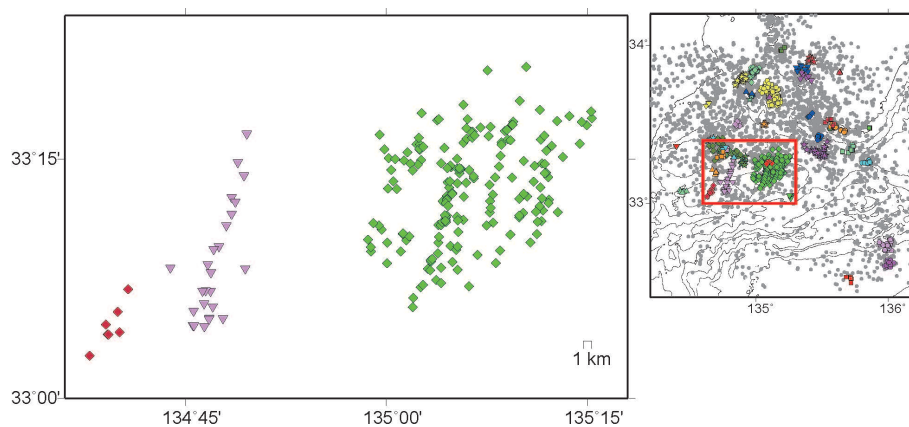


図3 紀伊水道沖の海洋性マントル内で発生した地震の震央分布

紀伊水道沖では、地震の多くが沈み込むフィリピン海プレートの海洋性マントル内で発生しているが、その中には直線上に配列して発生する地震クラスターが確認できた。

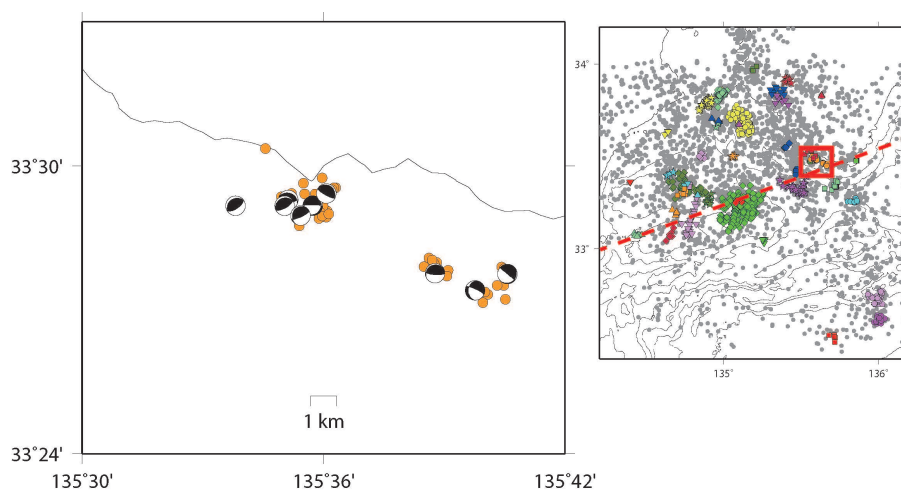


図4 紀伊半島潮岬沖地震のクラスター

紀伊半島潮岬沖では、プレート境界面上に低角逆断層型の地震がクラスターの的に発生している ..

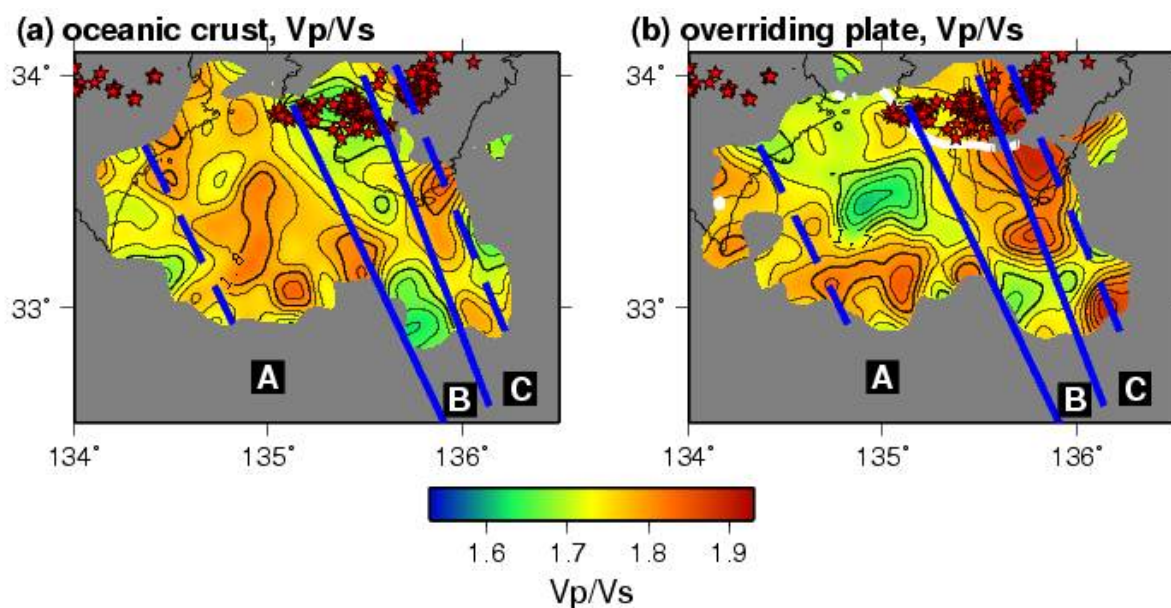


図5 フィリピン海プレート地殻内及び上盤側プレート最下部における V_p/V_s 比と低周波地震の分布
 フィリピン海プレート地殻内及び上盤側プレート最下部における V_p/V_s 比をカラー及びコンターで、低周波地震の震央を星印で示す。青線は、 V_p/V_s 比を参照して決定した構造セグメンテーション境界。低周波地震の分布と V_p/Vs 比は良い一致を示し、フィリピン海プレートの海洋性地殻で V_p/Vs 比が低い場所に低周波地震が発生している。そのすぐ東側では上盤側最下部における V_p/Vs 比が高くなっており、低周波地震は発生していない。

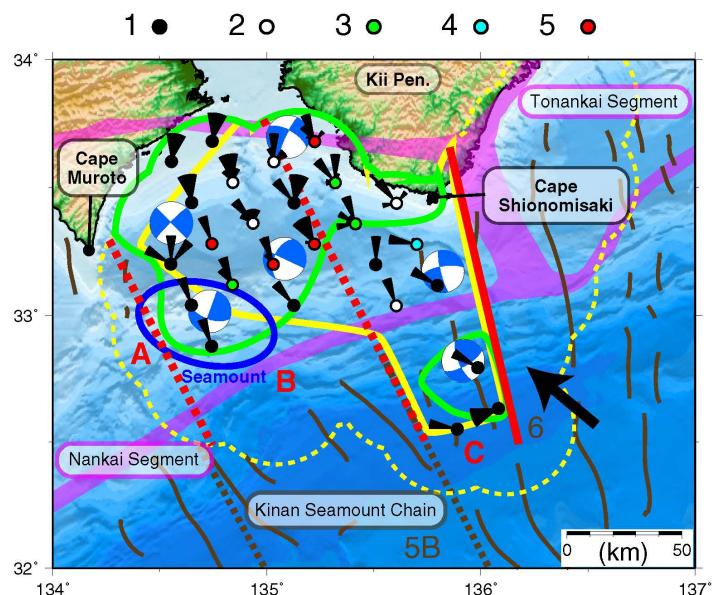


図6 震源メカニズム分布
 主軸方向の頻度分布を、ローズダイアグラムで示した。中心の円中の色は、その領域で決定されたメカニズムの個数を示す。代表的な震源メカニズム解もあらわした。紀伊半島西端沖を境界として、主軸方向がおよそ30度回転している。本図中に示されているBおよびCの領域は、図5中のAおよびBに対応する。

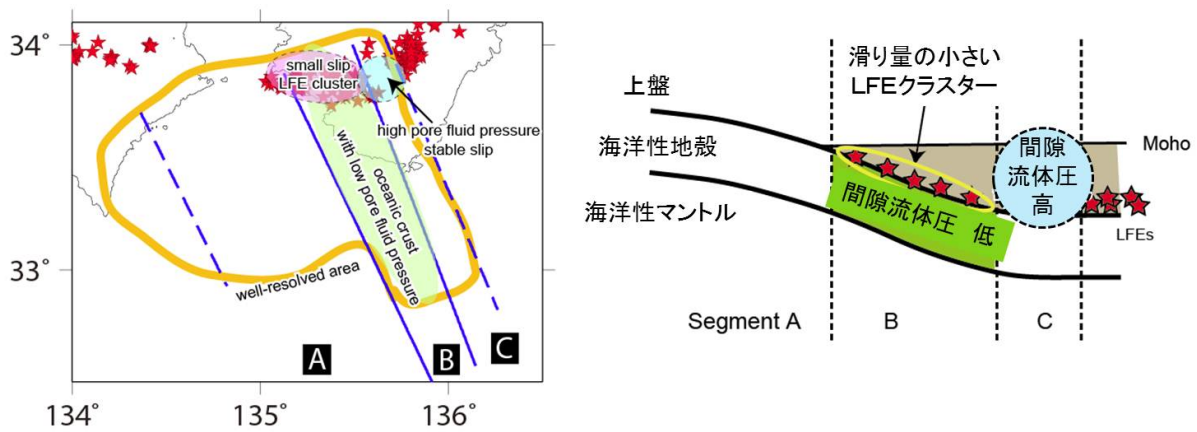


図7 紀伊半島周辺下における流体の分布モデル

V_p/V_s 比及び低周波地震の分布から考えられる、地殻内流体の分布に関するモデル。 V_p/V_s 比が低い海洋性地殻が沈み込んでいる場所（セグメント B）と一致して低周波地震が分布しているが、これらの積算滑り量は非常に小さい。そのすぐ東側の上盤側地殻最下部では流体が多く存在すると考えらる。

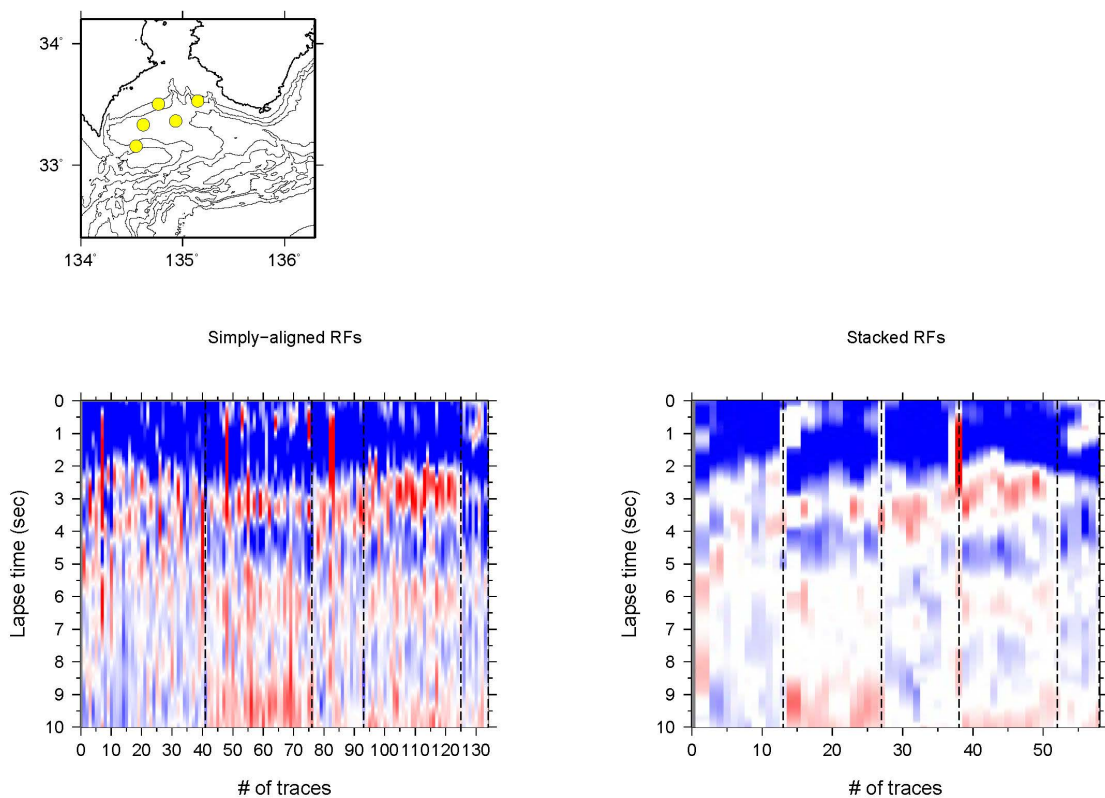


図8 レシーバー関数解析による構造断面

使用した観測点を、上図中の黄○で示す。左図が個々のレシーバー関数をプロットしたもの、右図がスタックした波形を示す。1～2秒に堆積構造の底部が、3～4秒に海洋性モホ面が認められる。

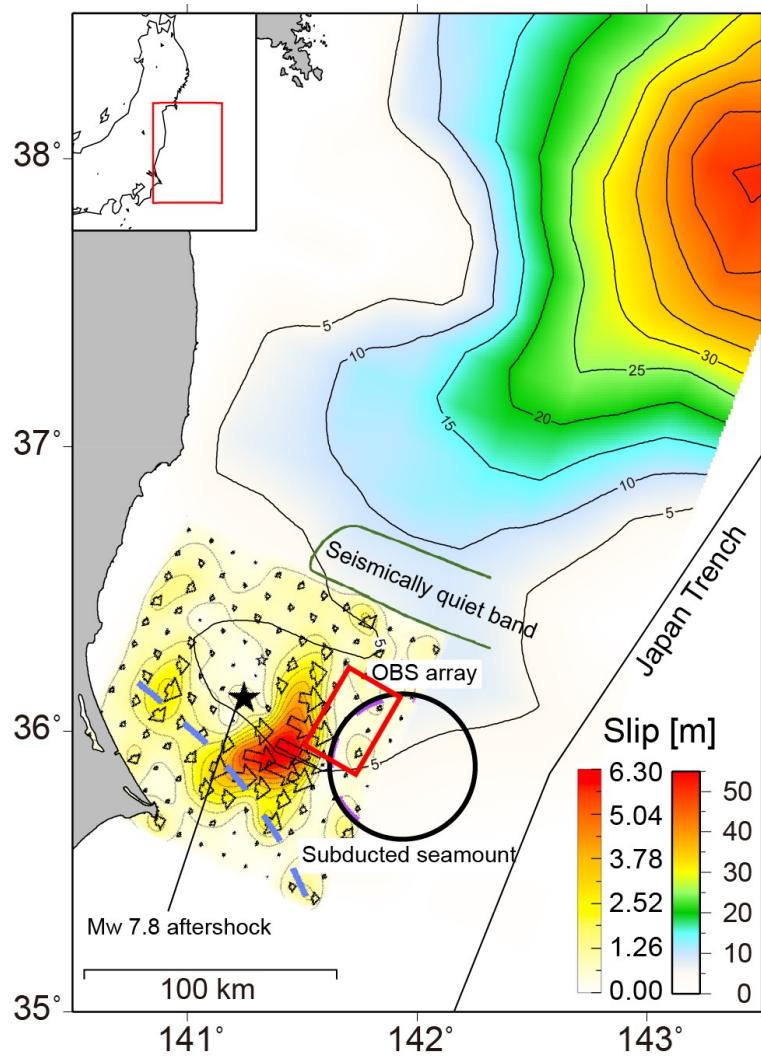


図9 震源域と茨城沖アレイの配置

図中赤枠は、2011～2012年に34台設置された海底地震計アレイの位置を、さらにカラーコンターは東北地方太平洋沖地震の本震（Yasgi and Fukahata, 2011）および最大余震（Kubo et al., 2013）の滑り量分布を示す。黒円は、深さ10 kmに沈み込む海山の位置を表す。

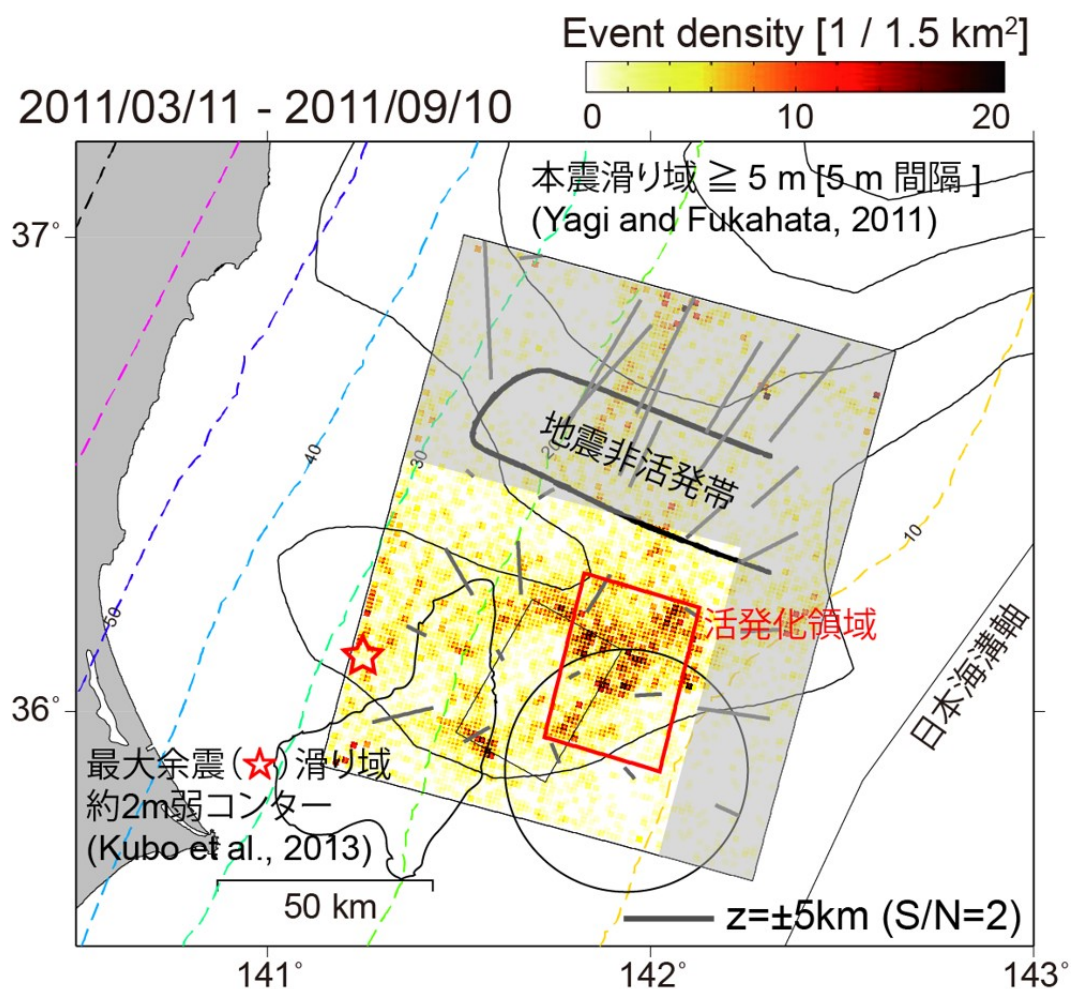


図 10 東北地方太平洋地震後の地震活動分布

茨城沖における東北地方太平洋沖地震発生後の地震活動度。図中のカラーイメージは、1.5 km 四方の小領域における地震発生個数を表したものである。カラーの点線は沈み込む太平洋プレート上面の震度を表す。黒実線によるコンターは、陸上観測点によって決められた滑り域を示し、北側が本震の、西側が最大余震のものを示す。黒丸が沈み込んだ海山の領域を示し、赤枠で囲った領域で最大余震後に地震が活発化した。灰色の実線は震央の決定精度の程度を表している。