

3. 2. 3 首都圏下のプレート相互作用を考慮した地殻・上部マントル構造解析研究

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏下においてフィリピン海プレートは、太平洋プレートの上に位置し、北端部では太平洋プレートに接触している。こうしたスラブ間接触やそれに伴うスラブ変形によって引き起こされる地震は、フィリピン海プレート上面だけでなく被害地震の震源となりうる（図 1）。スラブが別のスラブに接触しどのように変形するかというジオダイナミックなモデルによって、それぞれのスラブ内での変形のパターンやレベルを推定することができる。このジオダイナミックなモデルは、地震活動、地震波トモグラフィー、反射法、地震波干渉解析法などから得られる速度構造や不均質構造、S波スプリッティング、長期・短期の垂直地殻変動と速度などの観測データによって構築することができる。この研究では、関東から西南日本のプレートの三次元ジオダイナミックモデルを作製し、関東地域におけるフィリピン海-太平洋プレートのスラブ内変形について検討する。

(b) 平成 20 年度業務目的

ユーラシア-太平洋-フィリピン海プレートの広域三次元数値モデルを作成し、有限要素法によるスラブ相互作用についての、数値実験を開始する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学地震研究所 Univ. Southern California Los Angeles	教授 Research Associate Professor	佐藤比呂志 David Okaya	

(2) 平成 20 年度の成果

(a) 業務の要約

関東下に沈み込むスラブの運動についての諸問題を整理した。ユーラシア-太平洋-フィリピン海プレートの広域三次元数値モデルを作成し、有限要素法による粘性流体を用いたマントルウェッジの流動とスラブ内応力についての数値実験を行った。数値実験の結果、マントルウェッジ中の粘性と、スラブ内の粘性の比率によって、スラブ内の応力状態が大きく変化することが判明した。実際の地震活動と比較すると相対的に「弱い」スラブモデルが支持された。

(b) 業務の成果

首都圏は沈み込むプレートの三重会合点の近傍に位置し、プレートテクトニクスの上で極めて特異な条件下に立地している。このプレートテクトニクス上の特異なスラブの運動について理解することは、首都圏の地震活動を理解する上で極めて重要である。ここでは、

関東下のジオダイナミクスにおける問題点を整理し、複雑な二つのスラブの相互作用について検討する前に実施した単純な一つのスラブシステムについての非圧縮粘性流体を用いた数値実験について述べる。

1) ジオダイナミクス上の解決すべき問題点について

本州弧の沈み込み運動を動力学的に解析するためには、取り扱う問題によって異なるレオロジーモデルが必要になる。粘性流体は、大規模なスラブの運動を解析するのに適している。一方、弾塑性体は、リソスフェアと地殻内の変形を取り扱う上で有効である。関東での沈み込み運動に伴うスラブの挙動を理解するためには、房総沖の三重会合点に関連したプレート運動が重要である。対象となるプレートは、太平洋（PAC）プレート、フィリピン海プレート（PHS）とその上に重なるユーラシア・プレート（EUR）である（図 1）。以下に、関東下のスラブの運動についての解決すべき基本的な課題とそのための数値実験について整理する。

a) 太平洋-ユーラシアプレートのマントルウェッジ中へのフィリピン海プレートの沈み込みに伴う問題

この問題は、一つのスラブがもう一つのスラブから構成されるマントルウェッジ中に入り込む時に何が起こるかという問題である（図 2A）。スラブの沈み込みに伴って、マントルウェッジ中に流れが形成されている。マントルウェッジは海溝に向かって薄くなるため、もう一つのスラブが入り込むための空間がより狭くなる。新たに入ってくるスラブもしくは元からあるスラブは変形するのだろうか？ 数値実験では、新たなスラブの沈み込みに伴う体積の増加とそれによるひずみの発生（地震活動領域の形成）、そして両方のスラブの変形について検討する必要がある。最初の数値実験は粘性流体で行うが、最終的には粘塑性もしくは粘弾塑性物体でも検討が必要になる。また、一つのスラブの沈み込みによる背景としての応力パターンも、検討しておく必要がある。

b) フィリピン海プレートの移動方向の変化にともなうフィリピン海スラブと太平洋プレートの応答についての問題

フィリピン海プレートの運動は、1-4 百万年前に移動方向を変化させた^{1,2)}。この変化は、2 つの場所で新しいプレート・相互作用を生み出す。一つは、相模トラフである。ここではフィリピン海プレートの北方への沈み込みが、トラフに沿った方向への横ずれ運動に変化する。三次元的に見て沈み込んだスラブがどのように側方に移動するのであろうか（図 2B）。側方移動に伴う抵抗はどの程度のものであろうか。スラブ内部は、破断されるのだろうか？ 第二は房総三重会合点である。ここではフィリピン海プレートは、伊豆-マリアナ海溝から移動する。この時、太平洋プレートの海溝は西進するのか？ 三重会合点の北方では、日本海溝は西に進む必要はない。こうした運動は太平洋プレートに内部応力を発生させるか？ そして、この運動は太平洋のスラブの大規模なアーチ状の変形を引き起こすか？ こうした問題の解決には、三次元でのスラブの運動の数値実験は有効であろう。ただし、フィリピン海プレートそのものをどのような物体で近似するかは検討を有する。

c) フィリピン海プレートと太平洋プレートのスラブ同士の相互作用

Wu et al. (2007)³⁾や従来の研究(例えば Okada and Kasahara, 2000⁴⁾)は地震波トモグラフィーや再決定された震源データによって、関東下で太平洋プレートとフィリピン海プレートのスラブ同士が、相互作用をおよぼしていることを明らかにした。プレート相互作用が発生する領域が、関東の下の浅部に位置しているため(図 3)、ここで発生する中規模な地震でも直上の都市に被害を与える地震となる。沈み込んでいるスラブには、内部での折れ曲がりとスラブを引き込む応力が作用している。スラブ相互作用はそのシステムに対して別の独立した応力を重ね合わせることになる。これらのパターンは三次元的で、不均質性を有している。動力学的な数値モデルは、応力状態を求めることが可能であり、圧縮・引張・横ずれ型など発生する地震のタイプを予測できる。こうした計算では物体は、粘弾塑性である必要がある。

スラブ相互作用についての単純な例は、Ontong Java の場合である(図 4)。ここでは古い太平洋プレートはより若いオーストラリアのプレートにぶつかり、折れ曲がり、オーストラリア・プレート内で顕著な地震活動を引き起こしている。このような現象を数値実験で検討するには、粘弾塑性流体が必要となる。二次元近似は可能である。

d) 西南日本弧における大規模な波状を示すフィリピン海スラブの形状の問題

Nakajima and Hasegawa (2007)⁵⁾は、フィリピン海プレートの上面が波状の形状を示していることを見いだした(図 5)。大規模な波状の形状は、沈み込みに対して抵抗に成りうるし、その抵抗によってスラブ内部に応力の集中域が発生する可能性がある。これらは、地震観測と数値実験の両面から検討していく必要がある。

2) 本州の下のスラブの構造と応力状態

スラブの動力学的な問題を検討するためには、スラブの形状とスラブ内の応力状態を知ることが第一歩となる。スラブの形状は、広域的な地震波トモグラフィーによって明らかにされている⁶⁾。応力の状態は、震源分布と発震機構の分布から推定できる。図 6 は、東北地方南部を横切る広域的なトモグラフィー断面である。太平洋スラブは、正の速度異常として識別され、440-660km の不連続面まで追跡される。東北日本南部の島弧に直交する断面 1 と三重会合点から西南日本への東西断面では、太平洋プレートは西傾斜で沈み込み、440km 以下ではほぼ水平な形状を示している。四国東部を通る西南日本弧に直交する断面では、太平洋プレートは緩いアーチ状の曲率でほぼ水平に分布する。これは、日本海溝と伊豆・小笠原海溝方向での大規模な曲がりに関係している。小笠原から北海道南西部にいたる南北断面では、この広いアーチ状の部分は、浅部に従ってより明瞭になる。

スラブの上に位置するユーラシアやフィリピン海プレートは、このトモグラフィー断面では十分にイメージングされていない。本州中央部では、リソスフェアの厚みは、70km と推定されている⁷⁾。リソスフェアと地殻といったより浅層部のイメージングに焦点を絞ったトモグラフィーが必要である。

発震機構解は、ハーヴァードカタログの中でマグニチュード 5.3 より大きい 2007 年までの地震によって検討した⁸⁾。図 7 は、東北地方南部(図 6 の断面 1)を横切る断面での、

より詳細な発震機構と応力状態の検討結果を示している。Kostrov 総和⁹⁾を用いた発震機構解の検討や、CMT からの P-軸の解析は、ともにスラブと平行な p-軸配置を示す。これは、本州の下の太平洋スラブの大部分が圧縮を示すことを示す。スラブの傾斜方向の引張は、ここでは現れていない。

3) 一つのスラブの沈み込み運動の非圧縮粘性流体による数値実験

単純な沈み込みの際にスラブ内で発生する応力状態は数値実験によって検討することができる。スラブ内の応力状態は、スラブの形状、流動学的なパラメータ（スラブの強度）と周囲のアセノスフェアの強度に依存する。数値実験には、CitcomS と呼ばれる地球科学的な問題をとり扱うために開発されたソフトウェアを用いた。CitcomS は、ブシネスク近似で非圧縮性流体のナビエ-ストークス方程式を解く有限要素コードである^{10, 11)}。スラブは、スラブを通して一定の温度に対応した粘性（したがって密度）を有する部分としてモデル化した。スラブの形状は（図 8）、広域トモグラフィーによる地球の地震波速度構造モデルの上部マントル部分のデータ⁶⁾を用いた。

数値実験は、南カリフォルニア大学のスーパーコンピューターを用いた。このクラスターコンピューターは、2008 年 11 月時点で、合衆国で 7 番目、世界では 61 番目に高速な学術的に利用されているコンピューターである。CitcomS をセットアップして走らせるためには、最初、多くの手順が必要になる。

東北地方南部のユーラシアプレートの下の太平洋プレートの数値実験結果は、図 6 や 7 に示した地震カタログから得られた応力状態と比較される。太平洋・ユーラシアプレートの形状は、単純な二次元断面で設定したものと、地球規模のトモグラフィー断面⁶⁾により設定したものの二つがある（図 9）。太平洋スラブの強度について、周囲のマントルアセノスフェアに対して三つのケースで相対的な強さを設定した。すなわち、スラブは周囲のマントルアセノスフェアより 50、250 と 1000 倍の強度があるという設定である。単純な二次元近似のモデルでは、三種類の強さの比率の全ての場合において、太平洋スラブは、スラブのほとんどの領域で傾斜方向の引張を示す。

地球規模のトモグラフィー断面に基づくモデルでは、引張/圧縮のパターンは、強度比率に敏感である。スラブが周辺のマントルよりやや強度が大きい場合（50:1）、中深度での引張は弱く、傾斜方向での圧縮が現れる。スラブ強度が増加すると、浅部での引張が現れ始める。スラブは、一般的に中間の深さでの引張、スラブの曲げに伴う引張と、傾斜方向への圧縮を示す。東北地方南部の断面では、ユーラシアプレートの下の太平洋スラブは、ほとんど全て圧縮を示す（図 7）。この数値実験の結果はスラブの強度が周辺のマントルに比べそれほど大きくないこと、あるいは、周囲のマントルが強いことを示している。

この種の大規模な数値実験は、沈み込みに伴ういわば「背景として」の応力状態を作り出すことができる。この実験から得られた知見やパラメーターは、より複雑な場合の「制御」情報として用いることができる。今後、二つ目のスラブをマントルウェッジ中に沈み込ませる際には、新たな引張/圧縮領域が現れる。一つのスラブシステムの特性を理解していれば、どのような特性が二つ目のスラブによって発生したか、そして、何が一つのスラブシステムの特性として存在していたかを理解することができる。

(c) 結論ならびに今後の課題

ユーラシア-太平洋-フィリピン海プレートの広域三次元数値モデルを作成し、非圧縮性粘性流体による有限要素法を用いた数値実験によって、スラブ内の応力状態を検討した。スラブの強度を周辺のアセノスフェアーマントルに比べて設定して、実験した結果、相対的に弱いスラブモデルが、より観測されたスラブ内の応力状態とよい一致を示すことが明らかになった。これらの計算結果ではスラブ同士の相互作用については、考慮していない。今後、スラブ相互作用を考慮した二つのスラブシステムの場合について、数値実験を実施する。

(d) 引用文献

- 1) Seno, T. and S. Maruyama, Paleogeographic reconstruction and origin of the Philippine Sea, *Tectonophysics*, 102, 53–84, 1984.
- 2) Yamaji, A. (2000), The multiple inverse method applied to meso-scale faults in mid-Quaternary fore-arc sediments near the triple trench junction off central Japan, *J. Struct. Geol.*, 22, 429-440.
- 3) Wu, F., Okaya, D., Sato, H., and Hirata, N., Interaction between two subducting plates under Tokyo and its possible effects on seismic hazards, *Geophys. Res. Letts.*, 34, L18301, doi:10.1029/2007GL30763, 2007.
- 4) Okada, Y. and K. Kasahara, Earthquake of 1987, off Chiba, central Japan and possible triggering of eastern Tokyo earthquake of 1988, *Tectonophysics*, 172, 351-364, 1990.
- 5) Nakajima, J. and A. Hasegawa, Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, *J. Geophys. Res.*, 112, B08306, doi:10.1029/2006JB004770, 2007.
- 6) Li, C., R.D. van der Hilt, E.R. Engdajl, S. Burdick, A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle, *Gephchem. Geophys. Geosystems*, Q0518, doi:10.1029/2007GC001806, 2008.
- 7) Pacanovsky, K.M., D. Davis, R. Richardson, D. Coblenz (1999) Intraplate stresses and plate-driving forces in the Philippine Sea Plate, *J. Geophys. Res.*, 104, 1095-1110, doi: 10.1029/98JB02845
- 8) Alpert, L., A. Ghosh, T. W. Becker, I. Baliley, and M.S. Miller, Coseismic subduction zone strain-release as a constraint for slab dynamics, *EOS Trans. AGU*, 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract DI53A-1674, 2008.
- 9) Kostrov, V.V., Seismic moment and energy of earthquakes, and seismic flow of rocks, *Izv. Acad. Sci. USSR Phys. Solid Earth*, 1, Eng. Transl., 23-44, 1974.
- 10) Zhong, S., M.T. Zuber, L.N. Moresi, and M. Gurnis (2000), The role of temperature-dependent viscosity and surface plates in spherical shell models of mantle convection. *J. Geophys. Res.*, 105, 11,063-11,082.
- 11) Tan, E., E. Choi, P. Thoutireddy, M. Gurnis, and M. Aivazis (2006), GeoFramework: Coupling multiple models of mantle convection within a computational framework,

Geochem., Geophys., Geosyst. 7, Q06001, doi:10.1029/2005GC001155.

- 12) Mann, P. and A. Taira, Global tectonic significance of the Solomon Islands and Ontong Java Plateau convergent zone, *Tectonophysics*, 389, 137-190, 2004.
- 13) Phinney, E.J., P. Mann, M.F. Coffin and T.H. Shipley, Sequence stratigraphy, structural style, and age of deformation of the Malaita accretionary prism (Solomon arc-Ontong Java Plateau convergent zone), *Tectonophysics*, 389, 221-246, 2004.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

なし

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 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21年度業務計画案

ユーラシア-太平洋-フィリピン海プレートの広域三次元数値モデルを用いて、二つのスラブシステムの相互作用についての数値実験を行う。

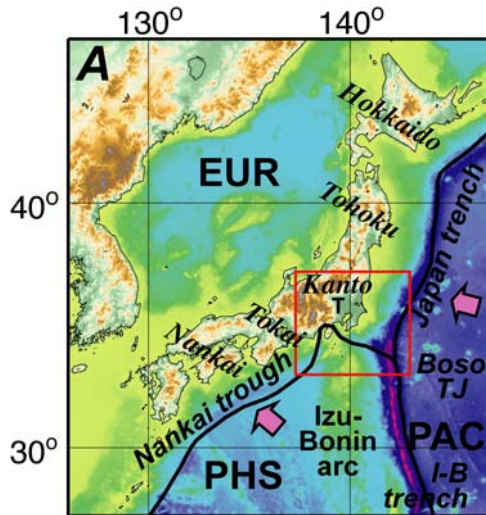


図 1. 本州と房総三重会合点の位置。太平洋プレートプレート (PAC)、フィリピン海プレート (PHS)、ユーラシアンプレート (EUR)。三重会合点(TJ)は関東の東方に位置する。

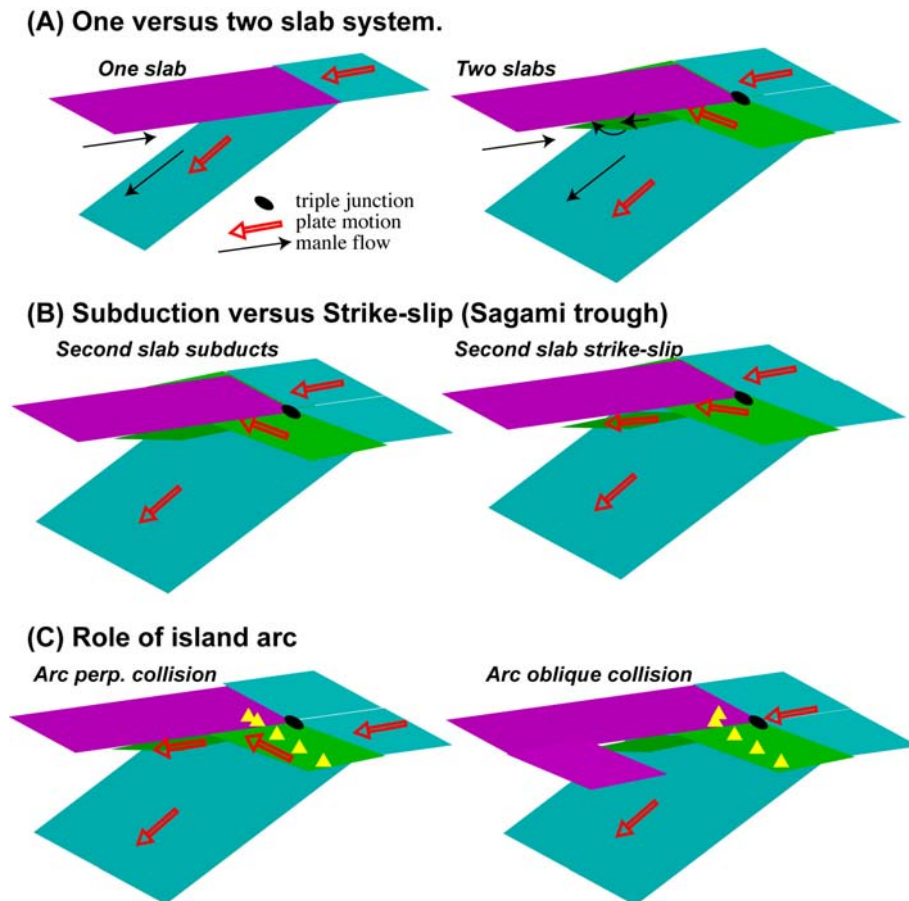


図 2. 本州中部と房総三重会合点のスラブについての問題を示す概念図

これらの概念図はフィリピン海 (緑色)、太平洋 (青色)、ユーラシア (紫色) の関係を示す。(A) 第二のスラブが既存のマントルウェッジに入るとき何が起きるか。(B) 二番目のスラブが沈み込みから横ずれに変わったときに何が起きるか。(C) もし第二のスラブが島弧を有していた時、島弧の存在は沈み込みに影響を及ぼすか。

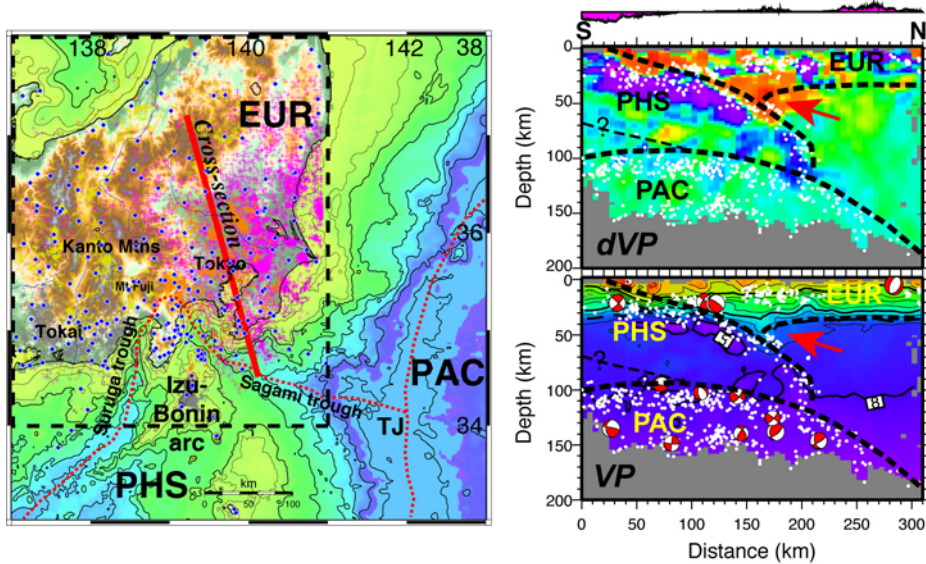


図3 関東下のスラブ相互作用。トモグラフィー断面の位置。+の記号はトモグラフィー断面で使用した震央。(右) トモグラフィー断面と震源。フィリピン海プレートは太平洋プレートの上に位置している。地震活動はフィリピン海プレート内の上部で発生。メガラストはフィリピン海プレートの浅い部分にある。Wu et al. (2007)³⁾による。

Ontong Java (AUS - PAC)

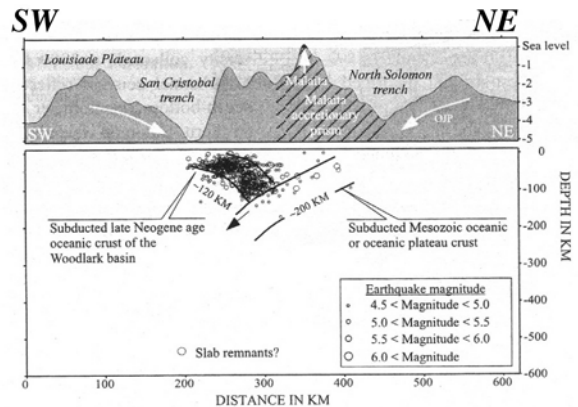
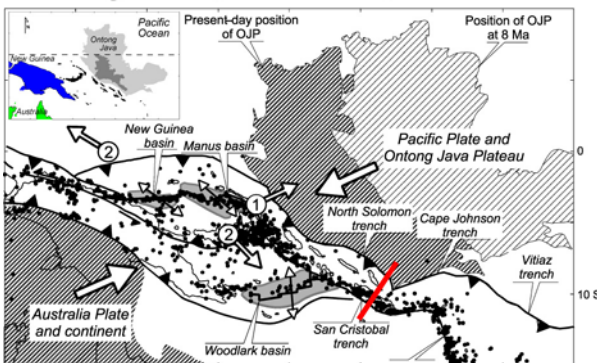


図4. オントンジャワにおけるオーストラリア-太平洋プレート境界^{12, 13)}。左図の赤線は右図の断面の位置を示す。若い Woodlark マイクロプレートは沈み込む、中生代の太平洋プレートにぶつかる。地震活動の活発化に注意。

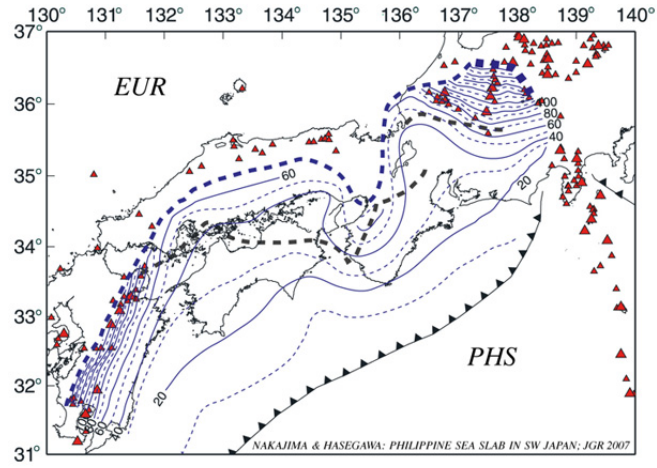


図 5 フィリピン海プレートの上面は走向方向への波曲を示す。これは沈み込みを妨害するか。Nakajima and Hasegawa (2007)⁵⁾による。

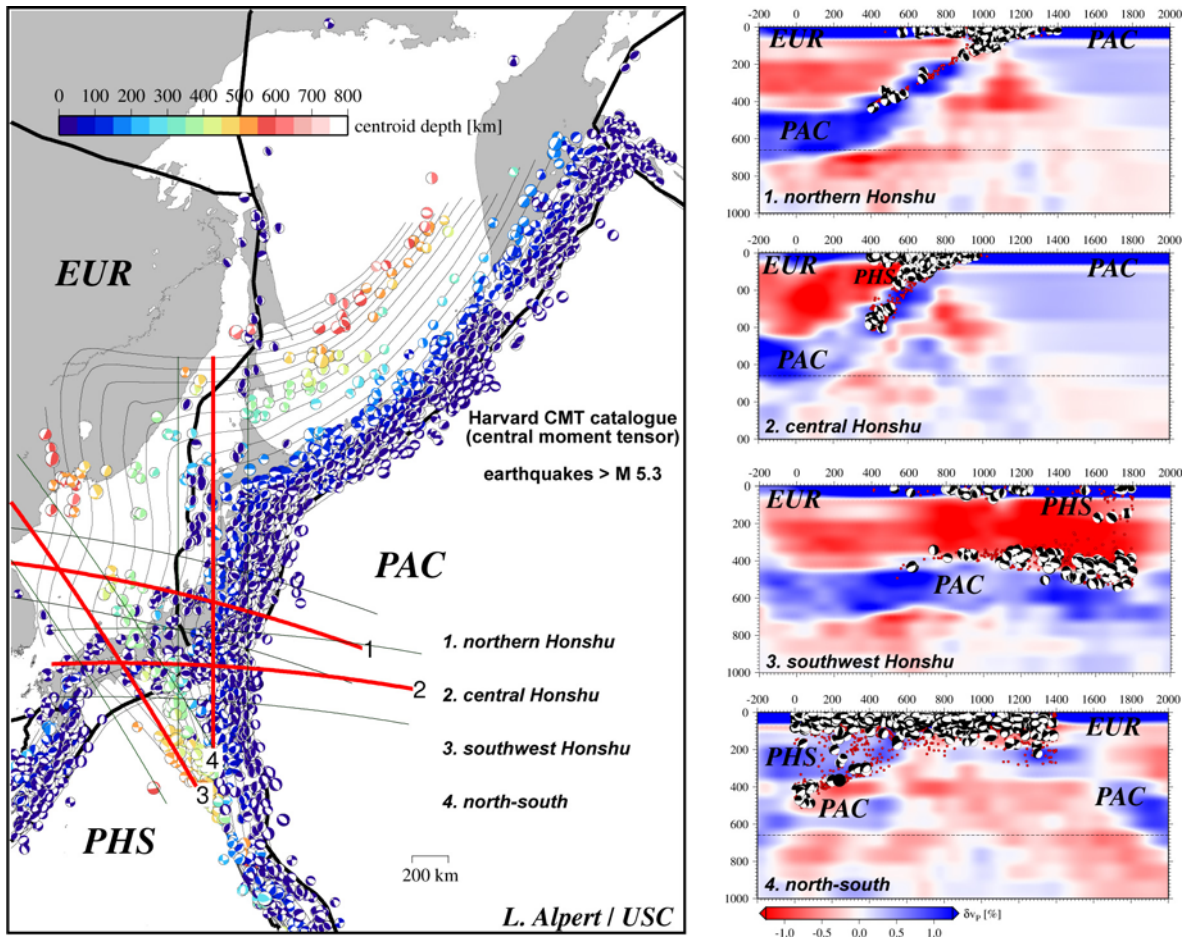


図 6. 日本列島周辺の地震活動と地震波トモグラフィー。(左)M5.3 より大きい地震の発震機構と日本周辺のプレート。トモグラフィー断面の位置は左の図の赤線として示した。平行な黒線は断面に投影した地震のデータの幅である。(右)トモグラフィー断面。断面 1: 東北地方南部での、太平洋-ユーラシアプレートのシステム。断面 2: 房総三重会合点を通る断面。フィリピン海プレートは断面の極浅部に位置する。断面 3: 太平洋プレートはユーラシア-フィリピン海プレートのシステムの下に位置する。断面 4: 太平洋プレートのアーチ状の曲がりと、三重会合点に関連した活発な地震活動を示す。

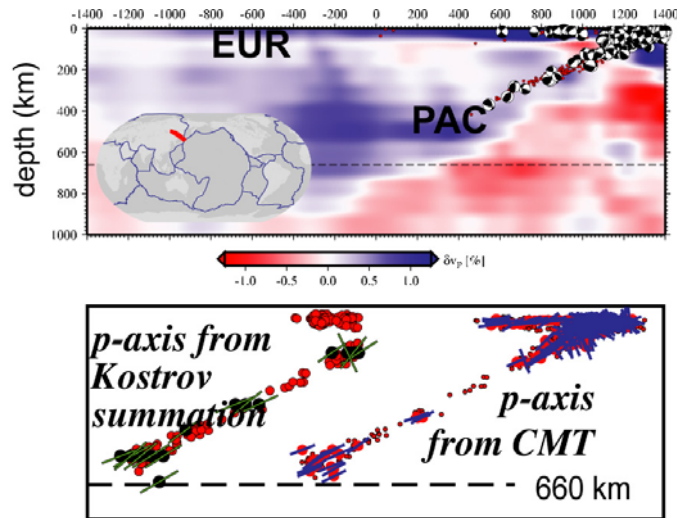


図 7. 東北地方南部断面の CMT 解。(上)トモグラフィーと地震活動。図 7 の断面 1。(下)P 軸の方向。左: Kostrov 総和による。右: CMT 解(セントロイド・モーメント・テンソル解)による。

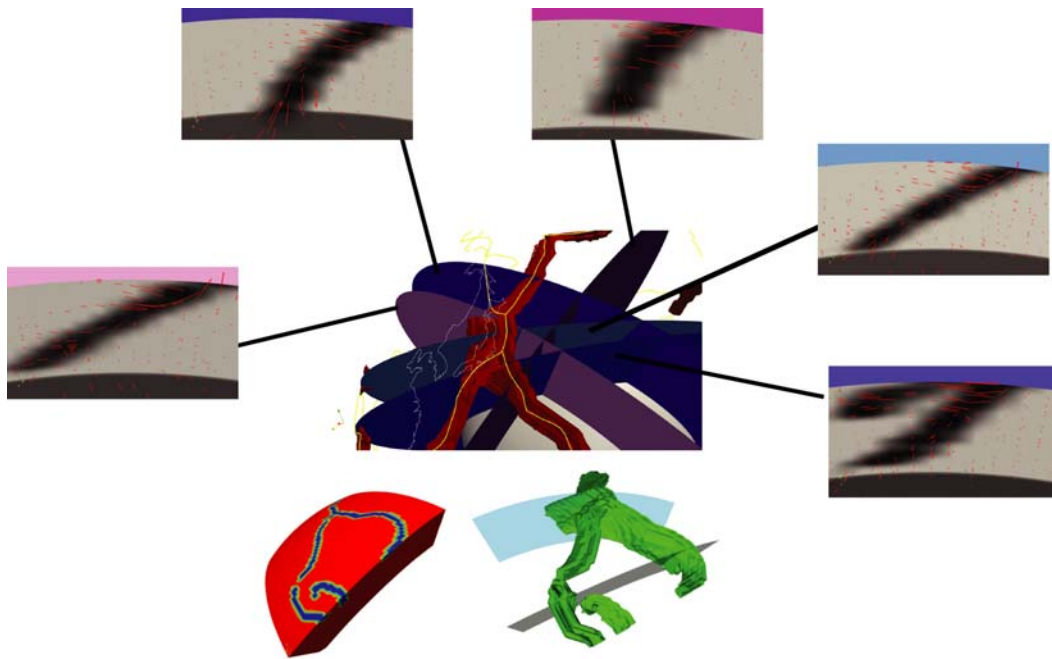


図 8. 日本周辺の沈み込み運動の数値実験モデル。フィリピン海プレートのユーラシアプレート下への沈み込み、太平洋プレートのフィリピン海-ユーラシアプレート下への沈み込みを考慮している。形状は地球規模のトモグラフィーモデルに基づく。物体は粘性流体。フィリピン海プレート北部周辺のプレートとスラブの形状は、下の図の半球と緑色の曲面で示している。このモデルでは、スラブの沈み込みに伴うスラブ内の応力状態を求めたもので、スラブ相互作用については、まだ考慮していない。

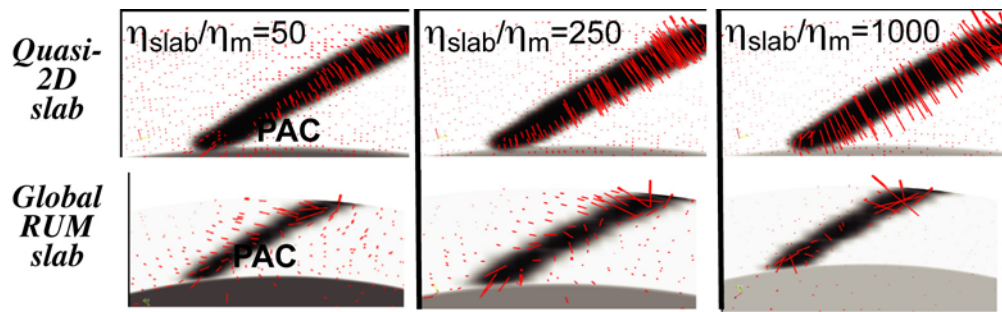


図9. 東北地方における太平洋プレートの沈み込み運動の数値実験から得られたスラブ内の応力状態。赤線は主圧縮応力軸の方向。中間的な深さでは圧縮となる。スラブの先端部は、周りのマントルに対しての相対的な強度によって引張から圧縮までさまざまである。上段は二次元、下段は地球規模のトモグラフィーに基づく、スラブ形状のモデル。アセノスフェア中の赤線はマントル中の流れに関連している。数値実験は Alpert et al. (2008)⁸⁾による。