

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。本研究では、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 19 年度業務目的

数値実験の準備として、既存の地球物理学的・地質学的データから、首都圏下に沈み込むフィリピン海プレートと太平洋プレートの相互作用についての定性的な検討を行うとともに、数値実験の準備を行う。

(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	教授	佐藤比呂志	
Univ. Southern California Los Angeles	Research Associate Professor	David Okaya	

(2) 平成 19 年度の成果

(a) 業務の要約

太平洋プレート-フィリピン海プレートの相互作用のモデル化に対して基礎的な考察を行った。とくに房総三重会合点の形状、二つのスラブが接合する際の内部変形およびマントルウェッジの挙動などが問題になる。例えば、図 2、図 3 の zone A と zone B では、フィリピン海プレートと太平洋プレートの相互作用あるいは衝突作用が、地震活動をコントロールしている可能性がある。こうした問題を明らかにするためには、一つのスラブの沈み込みの問題(図 2-4)を、将来二つのスラブの沈み込み問題に拡張して理解していく必要がある。

(b) 業務の成果

太平洋プレート-フィリピン海プレートはともにユーラシアプレートの下に沈み込み、関東地方の下でプレート間の相互作用が生じている。スラブ同士の接触、あるいはスラブ自

体の内部でのフィリピン海プレートの変形は、その上面で発生するメガスラストによる地震とともに被害地震の源となる¹⁾。一つのスラブが、どのようにもう一つのスラブに重なり運動するかについて理解するためには、それぞれのスラブ内部での変形の大きさや変形のパターン（歪み速度・速度場など）を求める必要がある。観測から得られるモデルについての制約条件としては、震源分布・トモグラフィー・構造的な形状・S波スプリッティング・測地的あるいは地質学的な垂直運動（沈降・隆起）とその速度などが想定される。本研究では、中部から西南日本にかけての広域的な三次元プレート構造モデルを作成し、関東直下でのフィリピン海プレートの変形に焦点を当て、どのような内部変形が発生するかについて明らかにするための研究を行った。

1) モデル化に際しての基本的な制約条件

関東下のプレート相互作用を考える上で、a) 太平洋プレートのユーラシアプレート下への沈み込みの開始時期、b) フィリピン海プレートの物性、c) 本州弧と太平洋プレートの沈み込みとの関係（図1）、d) フィリピン海プレートの運動方向の変化^{2)、6)}、e) 伊豆-小笠原-マリアナ島弧と太平洋スラブとの関係といった基本的な制約条件に留意する必要がある。c)に関して、図5には3つのそれぞれ異なる新生代における太平洋-フィリピン-ユーラシア・プレートのプレート運動の復元を、Seno and Maruyama (1984)²⁾、Otsuki (1990)³⁾とHall (2002)⁴⁾に基づいて、Miller et al. (2006)⁵⁾がまとめた図を示した。

2) 関東下における太平洋とフィリピン海スラブの衝突

Wu et al. (2007)¹⁾は、太平洋スラブとフィリピン海スラブが、関東下で衝突しているとう地震学的な証拠を示した。三次元トモグラフィーと再決定された震源分布は二つのスラブが接している領域内で地震活動が活発であることを示している。図3、図4には関東東部のトモグラフィーによる速度構造及び震源分布の断面図、震源分布の鳥瞰図を示した。図4において茶色で示したフィリピン海プレートの震源と赤紫で示した太平洋プレートの震源の分布が接していることが明瞭にわかる。スラブ衝突の最も顕著な例はOntong Java（図6）にも見ることができる。

この関東地域でOntong Javaにおけるスラブ同士が接触している例は、何故沈み込むスラブが、他と接触する際に地震活動が活発になるかという疑問を生み出す。

一つのスラブが別のスラブに乗って同時に同じ方向に沈み込む時に、脆性破壊が生じる領域を明らかにするための数値実験を行った。温度依存性のある弾塑性/粘弾性物体をモデルとして用いた。また、「破壊ポテンシャル」(failure potential)を地震発生のしやすさを示すパラメーターとした。このパラメーターは、構成則である塑性破壊と歪み履歴から得られる瞬間的な歪みと応力に依存すると同時に、水の存在、変形速度、封圧と孔隙圧にも関連している。結局、「破壊ポテンシャル」は、蓄積された歪みと有効差応力の積として表現され、実際の応力と同時に歪みの履歴も表すことになる。また、応力・ひずみの計算結果は、観測される発震機構解や歪み速度などと比較可能である。

地震学的なデータとモデリングの比較を示すために、ここでは二つの二次元での沈み込みの事例を示す（図7）。最初の事例は、通常の沈み込みである（図7A）。二番目の事例は、

深い場所でのスラブ同士の相互作用を表している（図 7B）。図 7A は海洋プレートが、大陸プレート下に年間 5cm の早さで、7 百万年間沈み込んだ様子を示している。海洋プレートの温度に影響を与えるプレートの年代は、1 億年としている。モデル領域は、長さ 1200km、深さ 300km である。モデルへの物質の流入は図の左側のみで許されており、物質の流出はモデルの底面で可能である。ここでは、Winkler 応力境界を置いて、アイソスタシーが成立するようにしている。上は自由表面である。地表は 10°C に、底面は 1330°C とする。物質は、温度依存の弾塑性/粘弾性体を仮定した。これに対して、スラブ相互作用のケース（図 7B）では、60 から 120km の間の深さで一つのスラブが、強く厚い弾塑性からなるプレートの上に乗って沈み込んでいる。衝突は強い海洋プレート（弾塑性）を年間 5cm の速度で領域の左側から流入させ、右側を固定することによって生み出している。これら図 7 に示した結果は予察的なもので、フィリピン海プレートや太平洋プレートのスラブ相互作用について直接に意味するものはない。しかし、これらのモデリングの例は、地震学的データと数値モデルがいかに比較可能であることを示すものになっている。

図 7 の最も上段の凡例は密度を示している。緑色は海洋性地殻、青は大陸性地殻、黄色からオレンジ色はマントル、赤はエクロジャイトである。温度と圧力により、エクロジャイトへの相転移が起きると、海洋地殻は 1 立方メートル当たり 400kg の密度増加となる。いずれのモデルでも大陸プレートと海洋プレート間に形成される剪断帯が示されている。ここでは、高い間隙流体圧に代表される要因で、大量の歪みが蓄積され、摩擦係数はゼロに近いレベルまで低下している。沈み込む深い位置の温度依存-弾塑性のスラブ（図 7B）は濃いオレンジ色で示されているが、温度構造は周りのマントルと同一である。図の中段は剪断応力場を、そして下段には発生する「破壊ポテンシャル」を示した。単一スラブの沈み込みの場合（A）、沈み込むプレートのアウターライズでの曲げによる応力が発生する。大陸プレートとの境界に発達するメガスラストは、数値実験でも表現されている。より深い部分では、二重深発地震面と解釈できる領域が広がる。また、50 から 200km の深さまでのスラブの底面でも三番目の弱いゾーンが見られる。使用したモデルでは、この深さでエクロジャイト化が進行し、剪断されたマントルが形成される。微弱な第三のゾーンは、スラブが曲がった状態からもどることによって発生している可能性を示している。

二つのスラブのケース（B）では、上の沈み込んでいるスラブの傾斜は緩く、沈み込みは下のスラブによって妨害されている。A のモデルと比較すると、二重深発面は消失している。これは、スラブの深さがエクロジャイト化が進行する深度まで到達せず、脱水作用が抑制されているためである。さらに、スラブの曲げも浅い沈み込み角度のため抑えられている。下に位置する深いスラブでは、二重深発地震面が存在する。これらは、上のスラブとの相互作用によって生じたプレートの曲げに起因する可能性がある。スラブとスラブの接触部では、剪断帯が形成され、地震を発生させるポテンシャルがある。

今後、関東下のプレート相互作用の変形様式を理解するために、三次元の関東下の太平洋スラブとフィリピン海スラブのモデリングが必要になる。

3) 太平洋プレートの関東下でのアーチ状構造

関東下で太平洋プレートは背斜構造となっている。図 2-4 は地震活動と速度構造を示す。この背斜構造はフィリピン海スラブと太平洋プレートとの衝突による影響の一つである。

また、この背斜構造は房総三重会合点の位置と日本海溝に位置に関連して形成されている（図 2-5）。図 8 は Ishida ⁸⁾ による太平洋プレートプレートの上面の等深度線で、関東における太平洋プレートの背斜構造が示されている。

上記のプレートテクトニクスモデリングの問題は動力学的なテクトニックプレートのモデリングを用いて解決できると考えられる。基本的な問題は太平洋プレートのアーチ状の形状の成因である。検証され得る仮説の一つとして、そのアーチ状の変形は 1-2Ma にフィリピン海プレートの移動方向が北方から西北西方向に変化したことと、房総 3 重会合点の履歴に起因するという可能性がある。二つ目の仮説として、フィリピン海プレート自体の拡大が、太平洋スラブを東方に押しやり、太平洋スラブの傾斜角を増大させるという考えがある。

一つ目の仮説では、5Ma まではフィリピン海プレートとユーラシアプレートの下に太平洋プレートが西方に沈み込み、フィリピン海プレートは北側へ沈み込んでいた（図 5、9）。その後 1-2Ma でフィリピン海プレートの移動方向が北から西北西方向に変化した。このフィリピン海プレートの西方への移動は同じく西方へ移動している太平洋プレートから離れる作用である。この作用により、日本海溝が曲げられ、それに対応して沈み込む太平洋プレートスラブがアーチを形成したと考えられる。

二つ目の仮説では、フィリピン海プレートは四国海盆のようにプレートが拡大されつつある。このフィリピン海の東方への拡大作用はフィリピン海-太平洋プレートの海溝とスラブを東方に押し出すことになる。房総三重会合点南部の太平洋スラブは三重会合点北側のスラブより急角度となっている（図 10）。房総三重会合点の南方に位置する日本海溝の東方への移動が、どのように太平洋プレートに作用し、三重会合点近くにアーチを作り出すことができるのかを検討する必要がある。

4) 広域的なジオダイナミックモデル

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するための準備作業を始めている。この広域的なモデルでは、当面、概念的なジオダイナミックな挙動についての研究を進めていく。図 11 には略化したスラブ上面の情報、図 12 には作成を予定しているものに類似した有限要素法メッシュの例を示した。

(c) 結論ならびに今後の課題

実際の数値実験に先立って、関東周辺のプレート相互作用が地震発生の要因となることを示し、関東地方のプレート相互作用についての基本問題について考察を加えた。特に、関東下のフィリピン海スラブは、地質学的時間スケールで沈み込んだものであり、太平洋プレートとの相互作用、太平洋プレートが形成するアーチ状の構造、フィリピン海プレートの内部変形は、一連の問題として理解する必要がある。本研究では、一例として温度依存性のある弾塑性/粘弾性二次元有限での沈み込みについての数値実験結果を示し、観測成果との比較可能性を例示した。今後、より詳細な地震学・地質学的情報を収集し、フィリピン海プレートの広域的な運動について検討するとともに、数値実験を実施していく予定である。

(d) 引用文献

- 1) Wu, F., Okaya, D., Sato, H., and Hirata, N.: Interaction between two subducting plates under Tokyo and its possible effects on seismic hazards, *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L18301, doi:10.1029/2007GL030763, 2007.
- 2) Seno, T. and S. Maruyama: Paleogeographic reconstruction and origin of the Philippine Sea, *Tectonophysics*, 102, 53–84, 1984.
- 3) Otsuki, K.: Westward migration of the Izu-Bonin Trench, northward motion of the Philippine Sea Plate, and their relationships to the Cenozoic tectonics of Japanese island arcs, *Tectonophysics*, 180, 351-367. 1990.
- 4) Hall, R.: Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations, *J. Asian Earth Sci.*, 20, 353-431, 2002.
- 5) Miller, M.S., B. Kennett, and V. Toy: Spatial and temporal evolution of the subducting Pacific plate structure along the western Pacific margin, *J. Geophys. Res.*, 111, B02401, doi:10.1029/2005JB003705, 2006.
- 6) Yamaji, A.: 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, 2000.
- 7) 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.
- 8) Ishida, M.: Geometry and relative motion of the Philippine Sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Geophys. Res.*, 97, 489–515, 1992.
- 9) Kanai, T., T. Miyamura, Y. Oishi, and A. Makinouchi: CHIKAKU DB/CAD: a system for modeling 3D tectonic structure, *Computer-Aided Design and Applications*, 2, 403-410, 2005.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・外の別
日本列島における後期新生界の変形集中域 (口頭) 招待講演	佐藤比呂志	日本地震学会2007 年度秋期大会	平成19年 10月25日	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・外の別
Interaction between two subducting plates under Tokyo and its possible effects on seismic hazards	Wu, F., D. Okaya, H. Sato, and N. Hirata	<i>Geophys. Res. Lett.</i> , VOL. 34, L18301, doi:10.1029/2007GL030763, 2007	平成19年 9月18日	国外

マスコミ等における報道・掲載

報道・掲載された成果	対応者氏名	報道・掲載機関	発表時期	国内・外の別
Research Highlights, Seismology: Double subduction, A unique plate interaction under eastern Japan poses an additional seismic risk for Tokyo and the surrounding region.	Katherine Anderson	<i>Nature Geoscience</i> ; doi:10.1038/ngeo.2007.22	平成19年 10月11日	国外

(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20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。

[図の説明]

図 1 プレート位置図。太平洋プレート (PAC)、フィリピン海プレート (PHS)、ユーラシアプレート (EUR)。

図 2 関東地域での PAC と PHS スラブの形状を示したブロックモデル¹⁾。

図 3. PHS と PAC との接合面を示したトモグラフィ断面¹⁾。zoneA と zoneB は図 2 による。

図 4. 関東地域での PAC と PHS スラブの衝突を三次元的に見た地震活動¹⁾。A-B (茶色の部分) は関東東部の PHS。

図 5 新生代における PAC と PHS のプレート配置図⁵⁾

図 6 オーストラリアプレートと **Ontong Java plateau** の衝突⁷⁾。この断面では沈み込む太平洋プレートが、オーストラリアプレートを切り取り、折れ曲げているように見える。太平洋プレートでは地震活動は低いのに対して、オーストラリアプレートでは高い地震活動を示している。

図 7 (A) 通常の沈み込みと (B) 同じ極性の面を持つ二つのスラブシステム (沈み込み-衝突) との比較。上からリソスフェアの密度構造、剪断応力分布、破壊ポテンシャル (有効差応力と蓄積された歪みとを掛け合わせて定義された数値)

図 8 Ishida (1992)⁸⁾ による太平洋プレート上面のコンターマップ

図 9 仮説その 1 : PAC の背斜状変形と PHS の移動方向の変化。プレート B が A の下に沈み込んでいる時にプレート A と B 両方の下にプレート C が沈み込む。もし、プレート B が方向を変化させたら B-C のトレンチはプレート B とともに移動せざるを得ない。

図 10 トモグラフィと地震活動による太平洋スラブの東西断面⁵⁾

左: フィリピン海スラブと太平洋スラブ (房総三重会合点のやや南方)。右: マリアナ弧を切る断面。

図 11 スラブメッシュ作成のための深さコンター

図 12 有限要素法に用いられるメッシュの例。PHS (左)、PAC (右)⁹⁾。これらのメッシュはプレート内部やプレート相互の動力学的な制約を明らかにするために使用される。

[図]

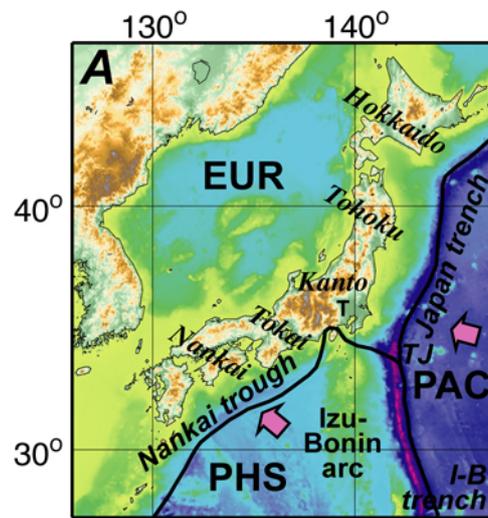


図 1. プレート位置図。太平洋プレートプレート (PAC)、フィリピン海プレート (PHS)、ユーラシアンプレート (EUR)。

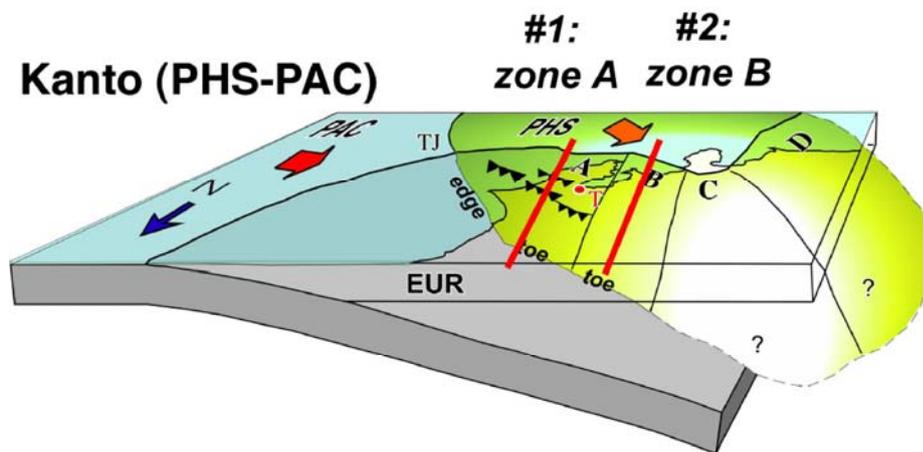


図 2. 関東地域での PAC と PHS スラブの形状を示したブロックモデル¹⁾。

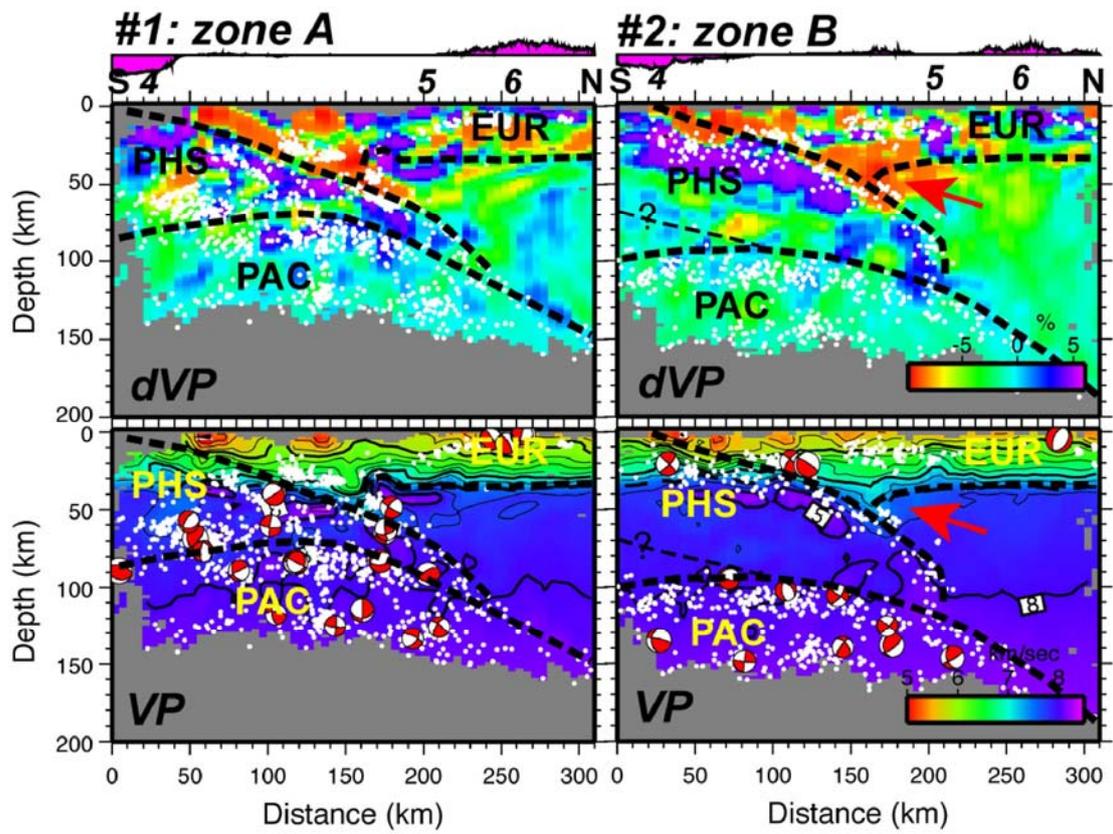


図 3. PHS と PAC との接合面を示したトモグラフィ断面¹⁾。zoneA と zoneB は図 2 による。

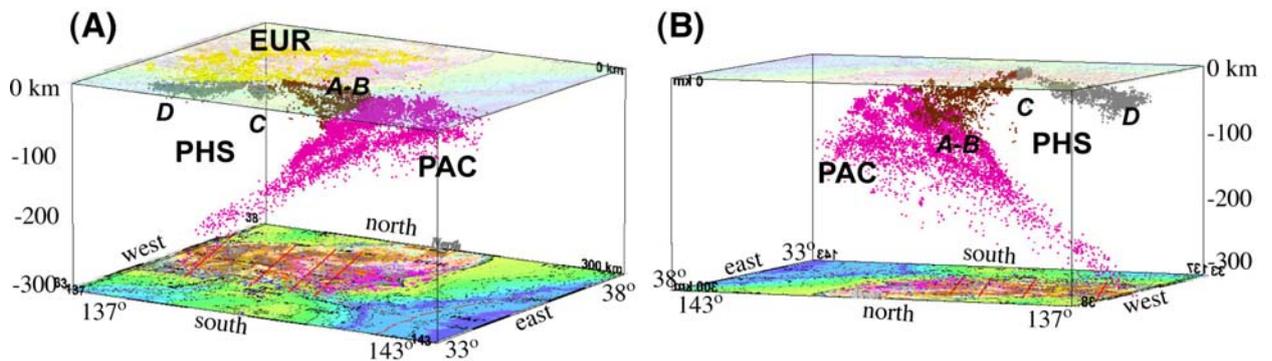


図 4. 関東地域での PAC と PHS スラブの衝突を三次元的に見た地震活動¹⁾。A-B (茶色の部分) は関東東部の PHS。

Miller et al. (JGR, 111, 2006) Evolution of subducting Pacific plate structure

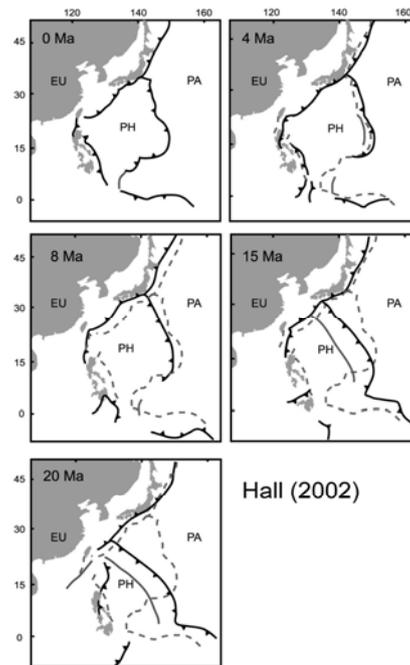
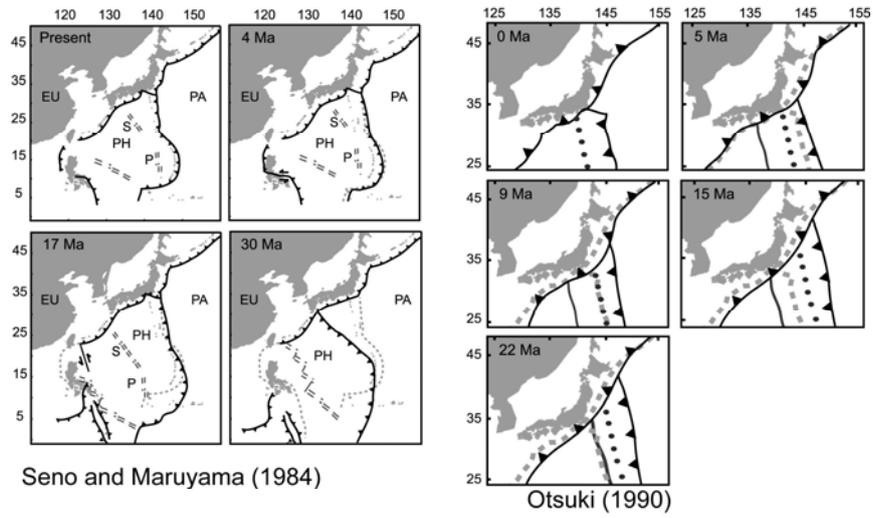


図 5. 新生代における PAC と PHS のプレート配置図⁵⁾。

Ontong Java (AUS - PAC)

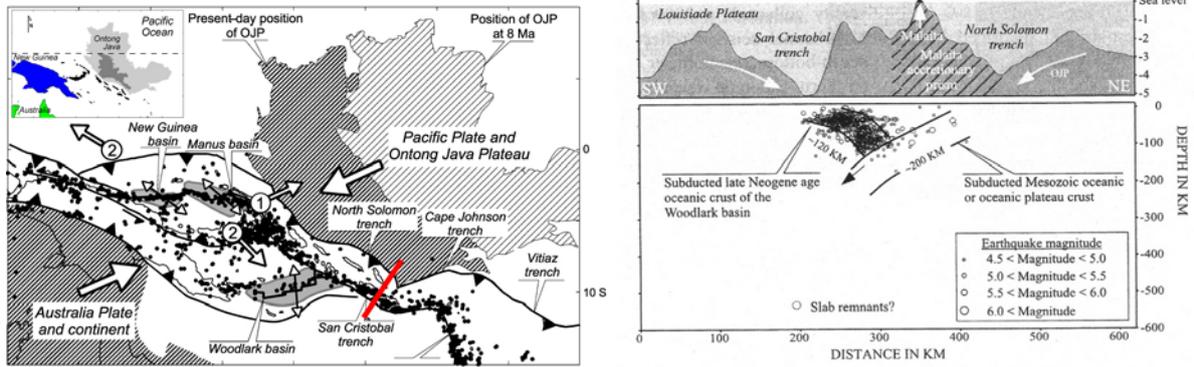


図 6. オーストラリアプレートと Ontong Java plateau の衝突⁷⁾。この断面では沈み込む太平洋プレートが、オーストラリアプレートを切り取り、折れ曲げているように見える。太平洋プレートでは地震活動は低いのに対して、オーストラリアプレートでは高い地震活動を示している。

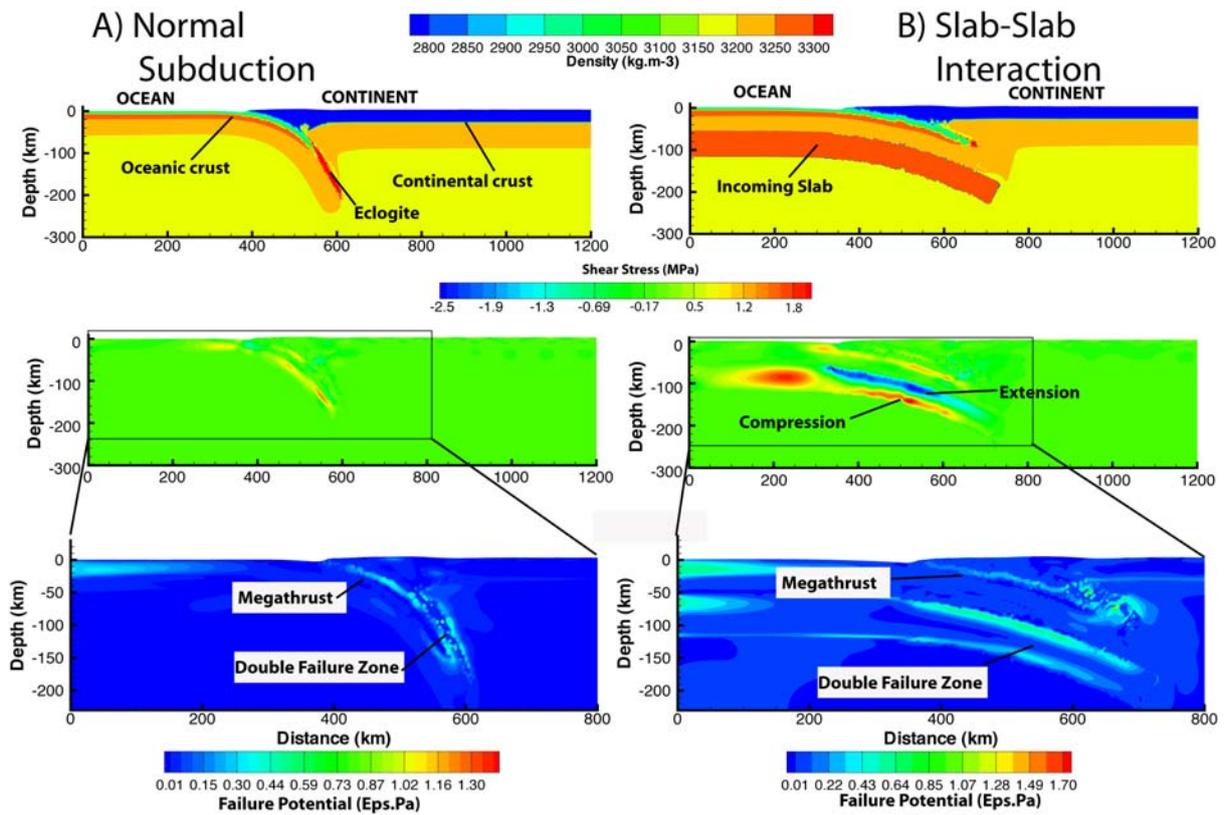


図 7. (A) 通常の沈み込みと (B) 同じ極性の面を持つ二つのスラブシステム（沈み込み－衝突）との比較。上からリソスフェアの密度構造、剪断応力分布、破壊ポテンシャル（有効差応力と蓄積された歪みを掛け合わせて定義された数値）。

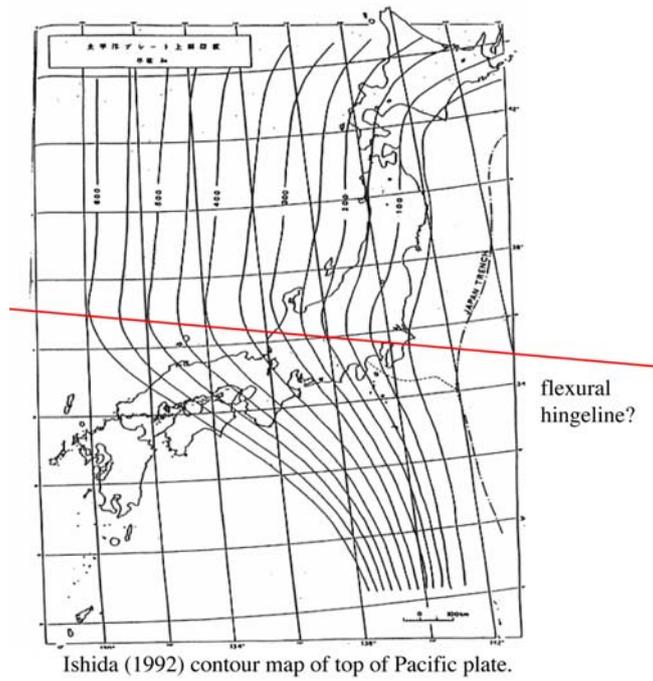


図 8. Ishida (1992) ⁸⁾ による太平洋プレート上面のコンターマップ。

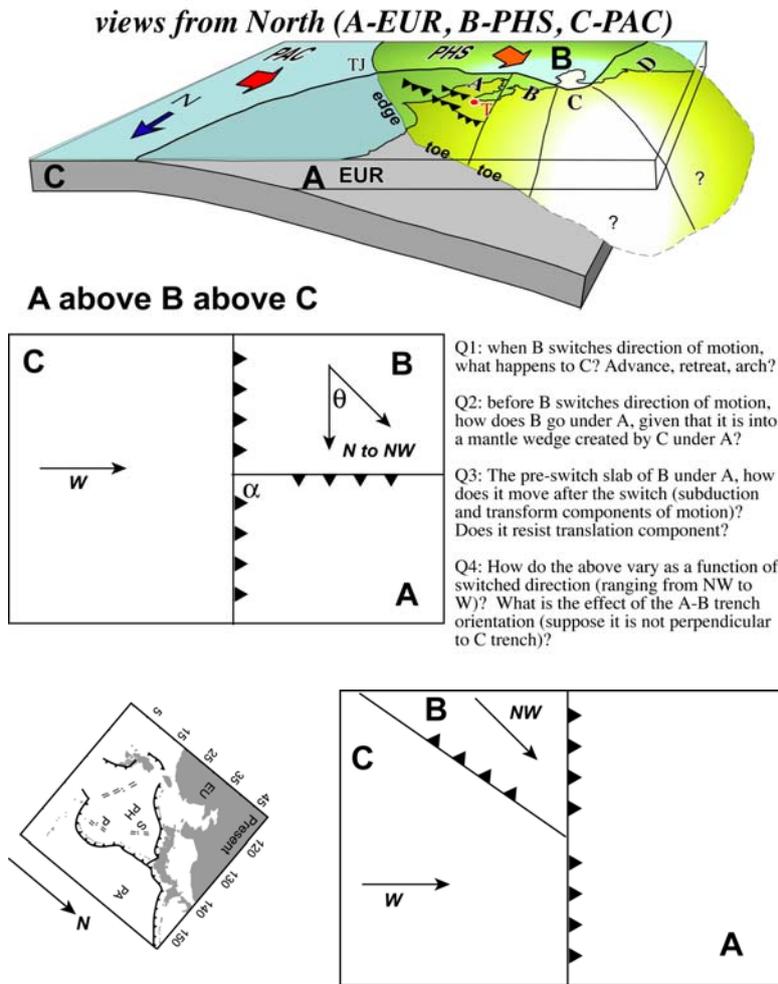


図 9. 仮説その 1 : PAC の背斜状変形と PHS の移動方向の変化。プレート B が A の下に沈み込んでいる時にプレート A と B 両方の下にプレート C が沈み込む。もし、プレート B が方向を変化させたら B-C のトレンチはプレート B とともに移動せざるを得ない。

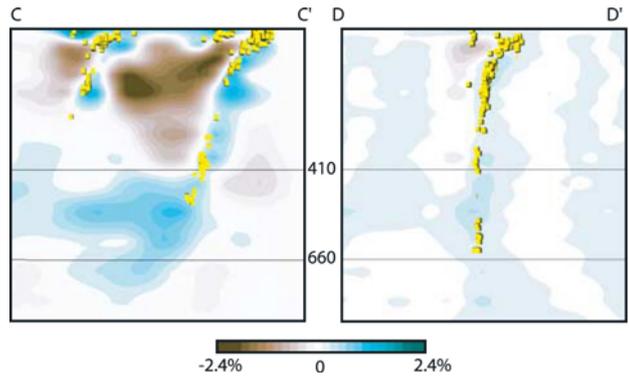


図 10. トモグラフィーと地震活動による太平洋スラブの東西断面 ⁵⁾
 左: フィリピン海スラブと太平洋スラブ (房総三重会合点のやや南方)。右: マリアナ弧を切る断面。

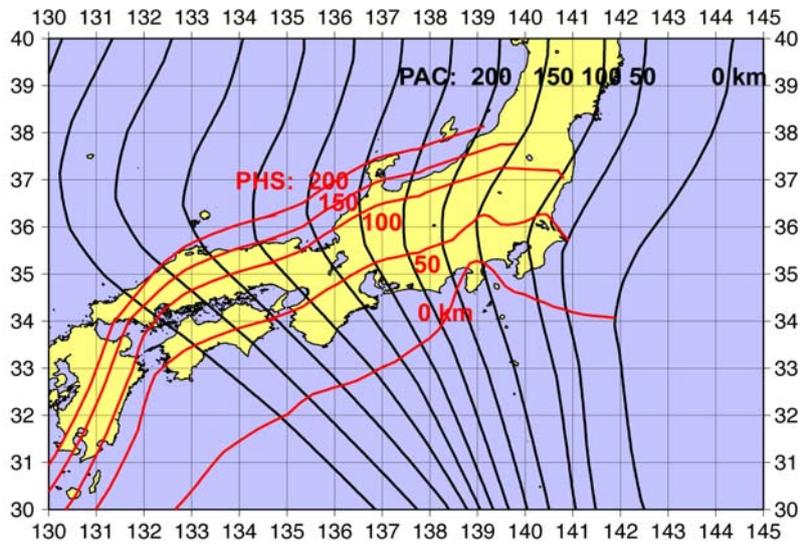


図 11. スラブメッシュ作成のための深さコンター。

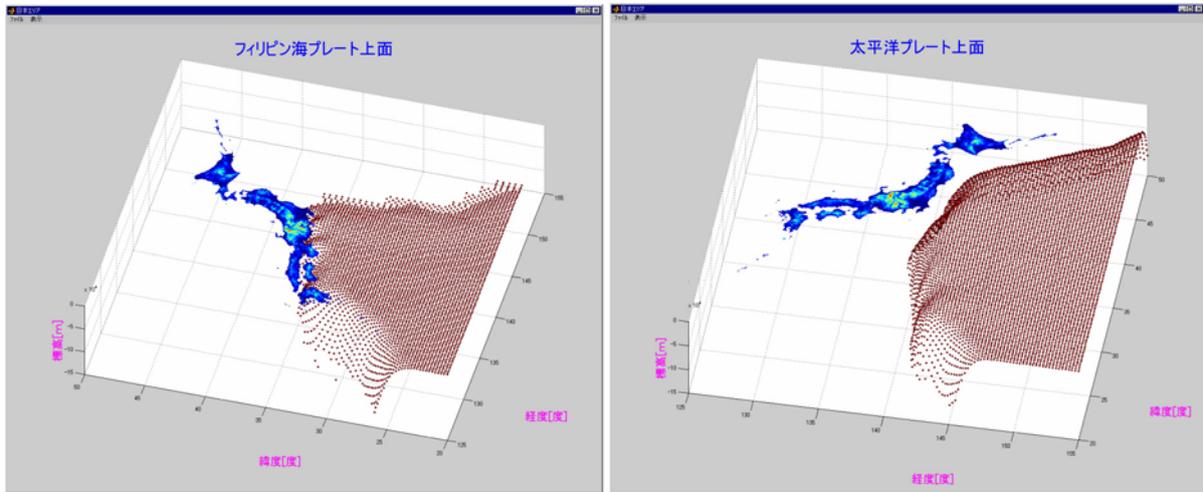


図 12. 有限要素法に用いられるメッシュの例。PHS（左）、PAC（右）⁹⁾。これらのメッシュはプレート内部やプレート相互の動力学的な制約を明らかにするために使用される。