

3. 2. 2 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。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波スプリットング、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 21 年度業務目的

数値実験を通してフィリピン海プレート北縁の運動と上盤プレートの相互作用についても引き続き検討を行う。

(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 Univ. Southern California Los Angeles	教授 Research Associate Professor	佐藤比呂志 David Okaya	
University of Texas Institute for Geophysics, Austin, Texas US	Associate Professor	Luc Lavier	

(2) 平成 21 年度の成果

(a) 業務の要約

粘弾塑性物体を用いて、二つのスラブの衝突によって発生するスラブの相互作用についての数値実験をおこなった。

(b) 業務の成果

1) 本州下での沈み込み運動についての力学的解析のための枠組み

日本列島下での沈み込み運動の力学的な解析では、対象とする現象によって異なるレオ

ロジーに対応した計算コードが必要となる。例えば、大規模なスラブの挙動の計算には粘性流体が、リソスフェアや地殻の変形の問題には弾塑性体が適している。工学的な三次元有限要素コードでは弾性または弾塑性体を用いて単純な沈み込み運動をモデリングすることができる。このコードによりスラブの曲げなどの問題を扱うことができる。

平成 21 年度に、我々は日本での沈み込みと関連した広域的な地殻変形について検討し、一連の課題を整理した。これらの課題の研究は地震災害に関する研究に対しても、基礎的な情報を与えるものである。対象とする現象に応じて、異なるレオロジーに対応する計算コードが必要になる。ここでは研究課題を 3 つのカテゴリに分類した。(1)サブダクションプロセス、(2)テクトニクスと構造、(3)地震災害関連である。

表 1・2 に掲げたそれぞれの課題は、個別の研究である。一連の研究課題は、太平洋プレート (PAC) とフィリピン海プレート (PHS) の運動によって引き起こされる日本列島リソスフェアの変形についての長期間に及ぶ研究に関連している。短期的には太平洋プレートとフィリピン海プレートの相互作用について、関東での地震災害についての関連も含めて研究を進めていく。

関東下のプレートの沈み込み運動を理解するためには、房総三重会合点に関連するプレートの挙動を理解する必要がある。これらのプレートは太平洋の (PAC) プレート、フィリピン海プレート (PHS)、およびユーラシアのプレート (EUR) である。図 1 はこれらのプレートの現在の配置を示しており、三重会合点が関東の近傍に位置していることが分かる。とくに北～北北西進～西北西進へのプレート移動方向の変化¹⁾は、中部から西南日本下に沈み込んでいるフィリピン海プレートの形状にも大きな影響を与えていると判断され、運動方向の変化に伴う上盤プレートの変形についても今後解明を要する問題は多い。

2) 一つもしくは二つのスラブの沈み込み系における力学バランス

力学バランスの検討は、沈み込み系の力学的な変形に対してどのようなテクトニックプロセスが最も本質的なのかを理解する上で重要である。東北日本は太平洋プレートがユーラシアプレート下に沈み込み単純な沈み込み系を構成する。一方、関東や中部日本では、太平洋プレートの上にフィリピン海プレートが位置し、二つのスラブの沈み込み系が存在する (EUR の下に沈みこむ PAC と PHS)。

力学的なバランスを理解するには、二つの方法がある。一つは、ある場所で作用する力を定義できれば、ある力によって生じる変形を特定することによって、作用している力の中での相対的な重要性(主要な力対副次的な力)を明らかにすることができる。二つ、二箇所に同じような力が存在していたとすると、一つの地点での力の変化と両地点での変形を比較することによって、もう一つの点の変形についても理解することができる。例えば、図 2 は沈み込むスラブの等温面を示している。スラブが下に引き込まれる力は橄欖石からスピネルとスピネルからペロブスカイト相への変化による密度増加によって生じる。もし、橄欖石からスピネルへの相転移が浅い深さで起こるなら、密度の大きいスピネルが浅い位置にあり、スラブの全重量を増加させ、その結果、スラブを下に引き込ませる力を増加させる。対照的に、スピネルからペロブスカイトへの相転移が、より大きい深度で起こるなら、これは、密度の大きいペロブスカイトを比較的密度の小さいスピネルに置き換える。

その結果、スラブを下に引き込む力を減少させる。スラブを下に引き込む力の変化はプレート境界での全体のカップリングに影響する。これは浅部で発生する地震に影響する。

まず、本州に沿って沈み込みに伴う力のバランスを検討した。北部本州(1つのスラブの PAC システム)、本州中部(2つのスラブのシステム)、西南日本(1つのスラブの PHS システム)における実際の力バランスを適用する前に、一般的な力の釣り合いについて理解する必要がある。

図3は一つのスラブおよび二つのスラブの沈み込み系に作用する力を模式的に示している。一つのスラブの沈み込み系(図3上)では沈み込みを駆動する力が存在する。他の力は、沈み込みを減速させるか、または遅らせる。これらの力は、スラブと陸側プレート間のカップリングを増大させるように作用する(プレート境界での力のバランス)。上盤側プレートに作用する力は、例えば浮力や背弧拡大による力を通じて、プレート間のカップリングを減少あるいは増大させる。

二つスラブの沈み込み系(図3下)では、2番目のスラブは最初のスラブのマントルウェッジに挿入される。この2番目のスラブによって二つのプレートカップリング力(上盤プレートと二番目のスラブ、および二番目のスラブと最初のスラブ)が生じる。二番目のスラブは、それ自身が沈んでゆく力を持っている。フィリピン海プレートの場合には、伊豆-小笠原弧の存在によって生じた浮力が存在する。

この二番目のスラブの導入はマントルウェッジの構造と流れ場に影響を与える。この変化は1つのスラブシステムに存在するマントルウェッジに作用している力を変化させる。本州北部(PAC-EUR)と本州中央部(PAC-PHS-EUR)にこれらの力の概念を適用するとき、力のバランスの変化がどのようにプレートカップリングに影響を与えるかが問題である。

3) 沈み込むスラブの解析のための力学的なコード

2008年度、粘性流体の有限要素法コードを使用することで一つのスラブのシステムの数値シミュレーションを行った。このオープンソースソフトウェアパッケージ(CitcomS)は非圧縮性流体のナビエ-ストークス方程式を Boussinesq 近似によって解くものである⁴⁾、⁵⁾。スラブはスラブ内では一定の温度依存性を有する粘性係数でモデル化する。このコードはプレート、スラブも粘性体として扱う。リソスフェアと地殻の変形の計算は、粘性体として取り扱う。

2009年度は粘性、弾性、塑性変形について計算を行うことができるコードを利用した。このコードはテキサス大 Luc Lavier 教授により開発されたもので、コードを使用する許可を得た。このコードの利点は以下の通りである。

- a) コードはリソスフェアの変形についての研究用に設計されている。
- b) サブダクションの進化など長時間に渡る変化を計算することができる。
- c) コードは以下の数値実験が可能である。(i) 弾性変形 (ii) クリープ則による粘性(延性)流動。(iii) モール-クーロン塑性流動。(iv) 浸食、断層帯、および弱線。
- d) コードは前年度使用した CitcomS よりも使用しやすい。
- e) コード作者(Lavier 教授)はアドバイスと科学上の議論が可能。
- f) Lavier 教授は、大陸地殻の伸張変形と沈み込みを伴う島弧衝突についての研究するため

に、このコードを使用した。

4) 弾性的な梁の曲がりに関する例

まず、キャリブレーションのため、簡単な弾性梁を定義して、曲げることにする。梁は始め水平で地殻スケールの厚さと特性を持っているとする。水平短縮速度は 5 cm/年として側方から与えた。図 5 は 8 万年後の梁を示したものである。重力は梁の中心部で（上に撓む梁とは対照的に）下側に働いている。

5) より強いスラブと衝突する沈み込むスラブのモデル

図 6 は傾いている強く厚い弾性プレートに衝突しようとする海洋スラブの沈み込みを示す。この例は、PAC と PHS を示すモデルであるが、PHS-PAC システムの正確なモデルではない。この例では、強い弾性プレートは左側で 50-150 km の深さに位置している。上部層のプレートは海洋地殻と大陸地殻の物質からなる。

衝突は、領域の左端に 1cm/年の速さで海洋と強い弾塑性プレートを流入させ、非移動式である境界を領域の右端に置くことによって、計算した。左端からの物質の流入は許容され、枠の外への流出は領域の底で、アイソスタシーを補償した圧力境界である Winker 応力を境界条件とした。上面は、自由な応力条件である。上面の温度は 10°C で底の温度は 1330°C とした。このモデルの物質のレオロジーは温度に依存する弾塑性/粘弾性である。

このモデルにおいて「PHS」は 2 つのプレートが衝突し始めて 60km 短縮したところで沈み込み始めた。PAC のストレス増加(D)と「PHS」の湾曲における高い圧力（D の赤い領域）が見られる。このストレスが単純なスラブの曲げの為なのか、スラブの相互作用によって上にあるスラブに伝えられたストレスなのか単純な条件での数値実験によって検討する必要がある。

これは現在周知の応力転移計算(e.g., Stein et al., 1992⁶⁾; Anderson and Ji, 2003⁷⁾) より洗練されたアプローチである。スラブ上面での地震活動の深さと地震活動度は PAC と PHS の強度を算定するのに有用である。

(c) 結論ならびに今後の課題

スラブ相互作用を明らかにするための適切な粘弾塑性体のプログラムが使用可能となった。今後、関東下の現状に即した数値実験を行い、フィリピン海プレート内の内部変形について、明らかにしていく必要がある。

(d) 引用文献

- 1) 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.
- 2) Schubert, G., Turcotte, D., Olson, P., Mantle convection in the Earth and planets: C. U. Press, 956 pp. (2001).
- 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) 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.
- 5) 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.
- 6) Stein, R., G. King, and J. Lin, Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude=7.4 earthquake, *Science*, 258, 1328-1332, 1992.
- 7) Anderson, G. and C. Ji, Static stress transfer during the 2002 Nenana Mountain-Denali Fault, Alaska, earthquake sequence, *Geophys. Res. Lett.*, 30(6), 1310, doi:10.1029/ 2002GL016724, 2003.

(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（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所（学会等名）	発表時期	国際・国内の別
Philippine Sea - Pacific Slab Interaction as an Additional Cause of Seismicity Beneath Kanto	Okaya, D., Sato, H., Hirata, N., Lavier, L., Wu, F.,	The 3rd SCEC-ERI joint workshop ERI, Tokyo, Japan	2010年3月16日	国際

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 22 年度業務計画案

粘弾塑性物体を用いて、関東下のプレート相互作用を想定した数値実験をおこなう。

表 1 日本列島周辺のジオダイナミクス上の問題と必要となる数値実験のタイプ

ジオダイナミクス上の問題	構造とテクトニクス	数値実験のタイプ
ロールバック運動と背弧拡大		
中新世の太平洋プレートのロールバックと東北日本の背弧拡大/琉球弧の現在の沈み込み運動と背弧拡大/ニュージーランド北島ヒ克蘭ギ沈み込み帯	上盤プレートの引張構造、北米 Basin and Range の構造・コアコンプレックスの形成と類似/高い地温勾配での正断層リフトシステム	二次元粘弾塑性体
島弧-島弧衝突		
伊豆衝突帯・日高衝突帯での島弧-島弧衝突運動	地殻の付加の様式と沈み込みに伴う構造的浸食	2次元粘弾塑性 単純な物体で近似した工学的三次元コード
3次元での沈み込み・島弧変形		
房総三重会合点の動きと太平洋プレートの長波長のアーチ状の変形	斜めからの変形（横ずれ変形）	大規模な三次元粘弾塑性コード
西南日本下のフィリピン海スラブの短波長変形	斜めからの変形（横ずれ変形）	大規模な三次元粘弾塑性コード
フィリピン海プレートの運動方向の変化（TTT → TT-transform）	斜めからの変形（横ずれ変形）	大規模な三次元粘弾塑性コード
地震活動・地震災害関連		
太平洋(PAC)とフィリピン海(PHS)スラブの相互作用	PHS スラブ内の地震は太平洋プレートとの相互作用か	(a) 二次元粘弾塑性 (b) 単純な 3D、弾塑性 (c) 完全 3D 粘弾塑性コード
地質学的変形速度と測地学的変形速度の不一致	本州弧での対比	解析解によるアプローチが有効か。
フィリピン海スラブの波状構造	リソスフェアーマントルの剥離/背斜状部分からの地殻への応力伝達はあるか/ここでの構造浸食はあるか	三次元コード
伊豆-小笠原弧の衝突 vs 沈み込み	スラブと上盤プレートの構造差/地震活動の空間的差異の検討	三次元コード

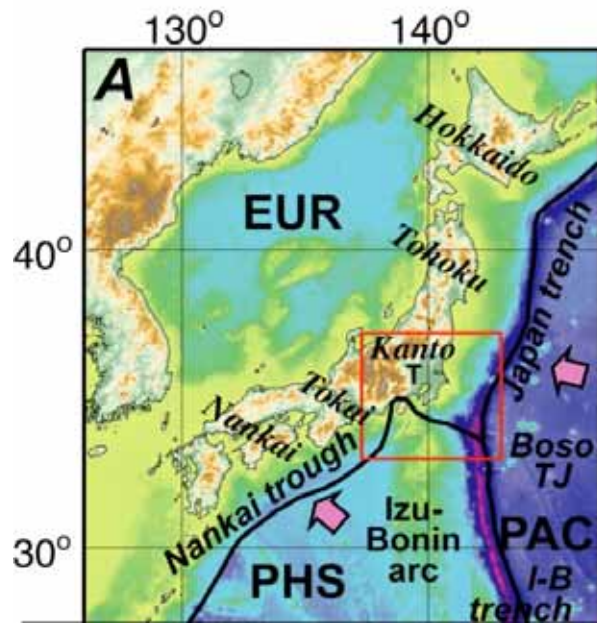


図 1. 本州と房総三重会合点の位置。太平洋プレート（PAC）、フィリピン海プレート（PHS）、ユーラシアプレート（EUR）。三重会合点(TJ)は関東の東方に位置する。

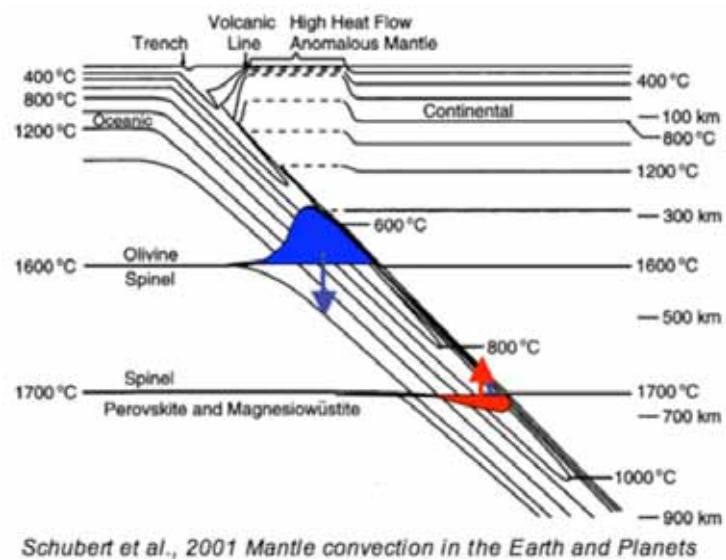


図 2. 沈み込むスラブの熱構造。力学的なバランスのため、相変化の深さが異なる場合、正味のスラブ-プル力もスラブの質量の変化に応じて変化する。Schubert et al. (2001)²⁾による。

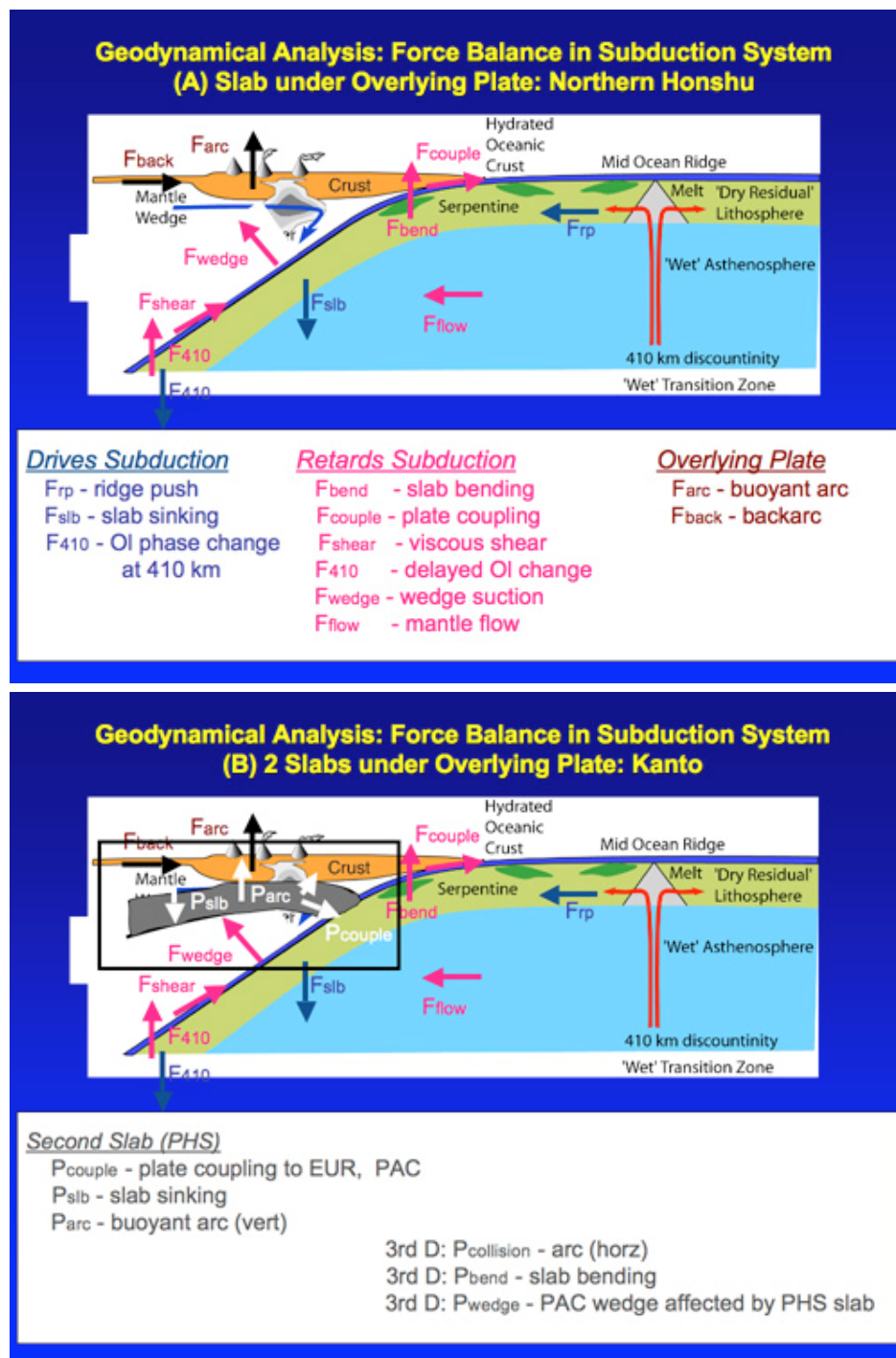


図3 一つのスラブ（上）と二つのスラブシステム（下）に作用する力の概念図。
 さまざまな種類の力が作用している。すべてが本州システム当てはまるわけではない。
 (上) スラブに作用する力は、沈み込みを促進させる力、沈み込みを減速させる力、および
 上盤プレートから供給される力から構成される。(下) マントルウェッジの中に2つめの
 スラブを追加すると、新しい力が生じる。

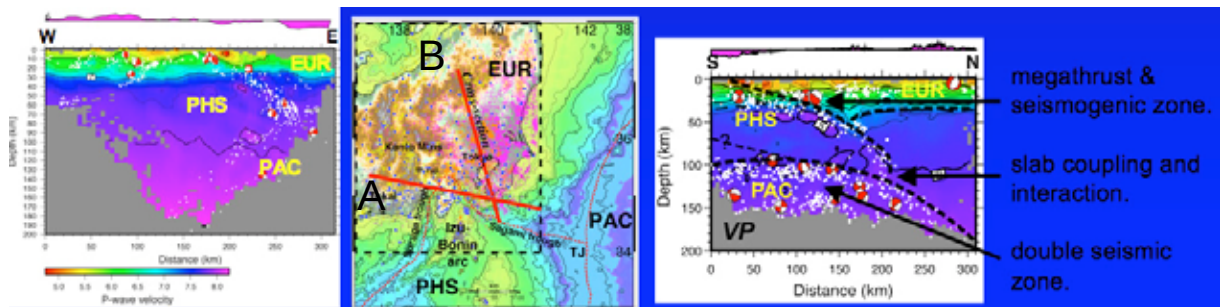


図 4. 関東の地震波トモグラフィー (Wu et al., 2007) ³⁾と 地震活動は力の釣り合い解析に対して観測結果からの拘束を与える。赤線で示した A 断面は左側の図面と対応しており、図 3 (下) の概念図に相当する。

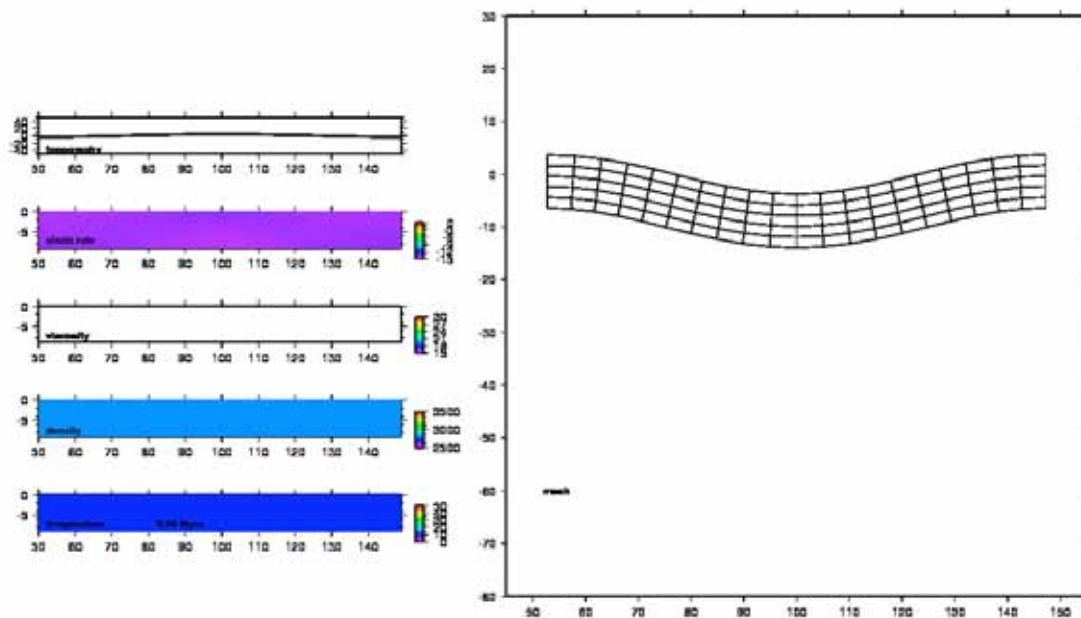


図 5 簡単な弾性体からなる梁の曲がりを使用したキャリブレーションテスト。右側の図のメッシュは梁の曲がりを示している。重力は（梁の両側が上がる代わりに）中心部を下げるように働く。左側の図は地形（inverse）、歪み速度、空白、密度、温度分布を示す。

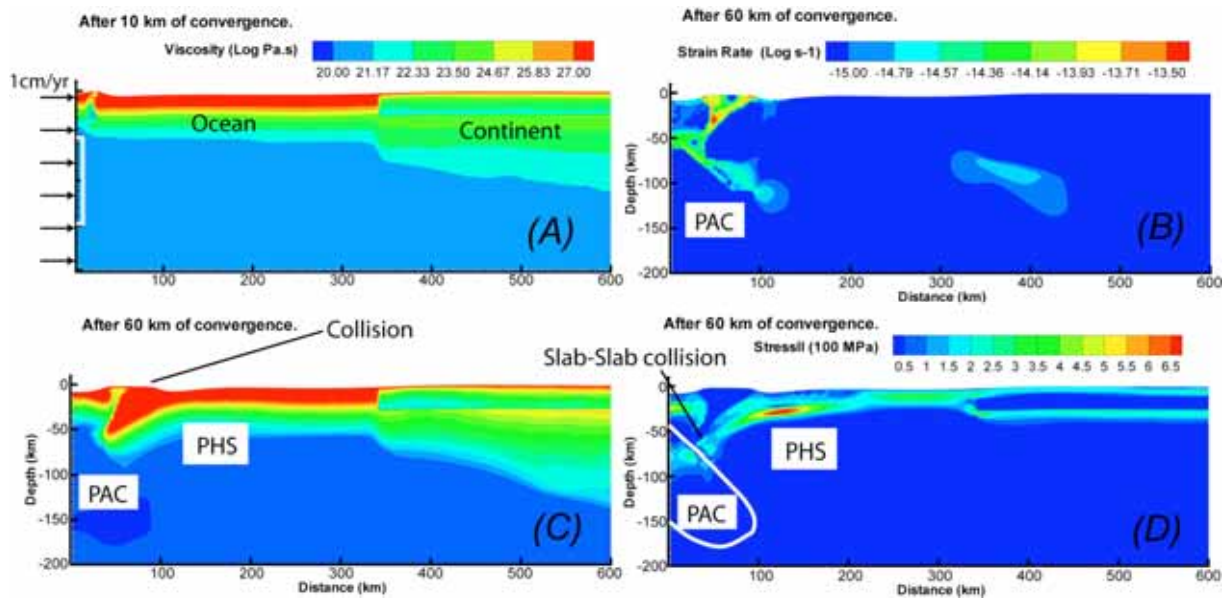


図6 接触した2枚のスラブの数値実験(沈み込み-衝突)。 水平変形速度の大きさは矢印によって示される。(A) 10km 短縮後の粘性断面。 海洋プレートの沈み込みが開始した。(B-D) 60km 短縮後のひずみ速度、粘性、圧力状態。粘性断面(C)は PAC が若いスラブ(PHS)と接している深さを示している。ひずみ率断面(B)では高いひずみ速度はプレートが最も強いところと、プレートの境界部に集中している。圧力断面(D)は衝突により PAC に伝えられた圧力を示している。圧力が高い領域(赤)は PHS の曲がりの部分に対応する。この初期的なモデリングにおいてはその原因は片方のスラブの曲がりによるものか、衝突による圧力の上昇によるものか不明。