

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、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ジオダイナミックモデルを作成し、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 22 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	教授	佐藤比呂志	
Univ. Southern California Los Angeles	Research Associate Professor	David Okaya	
University of Texas Institute for Geophysics, Austin, Texas US	Associate Professor	Luc Lavier	

(2) 平成 22 年度の成果

(a) 業務の要約

粘弾塑性物体を用いて、2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) 関東直下のプレート沈み込み運動のジオダイナミクス解析の目的

関東の地下におけるプレート沈み込み運動の挙動を理解するためには、まず房総沖の三重会合点に関連した、太平洋 (PAC)・フィリピン海 (PHS) およびユーラシア (EUC)

プレートの挙動について理解する必要がある(図1)。

ジオダイナミクス解析を行うにあたり、(1) PHS スラブは相模トラフの北側では PAC と EUR の間のマントルウェッジにどのように沈み込んでいくのか、(2) 相模トラフで PHS が走向すべりを起こす原因と、三重会合点で PHS の西進に対応して PAC はどのように挙動するのか、(3) PHS と PAC の相互作用によってスラブの変形が生じるのかどうか、(4) 伊豆小笠原弧が西南日本弧と衝突することによって、PHS の沈み込みを鈍化させ、結果として地殻ないしは地殻とマントル・リソスフェアのクロコダイル構造が形成されるのかどうか、(5) 西南日本では何故湾曲した浅いスラブが容易に沈み込んでいるのか、またスラブの湾曲が沈み込みに与える寄与はどのようなものか、といった検討すべき問題点がある。

2) 地震波トモグラフィおよび地震活動から示される PHS と PAC の相互作用の証拠

近年の地球物理学的研究から、PHS と PAC はともに関東の地下で EUC の下に沈み込んでおり、非常に近接しているために互いに影響し合っていることが分かってきた。筆者らは、地震波トモグラフィと震源の再決定を行い、関東の地下で沈み込む PHS および PAC の 3 次元構造を明らかにした (Wu et al., 2007)¹⁾。関東東部の地下では、PHS は PAC スラブの上面の上に乗り上げる形となり、また周辺と比べて地震活動も活発である (図 2 左)。地震の震源メカニズムは様々であり、PHS のメガスラストと関連づけることはできない (図 2 右) が、地震活動の増加は 2 つのスラブの間の相互作用、すなわち (a) 2 枚のスラブが斜めに衝突するために発生するスラブ間地震 (図 2 左) と (b) PHS の下端が PAC スラブにぶつかることによって、PHS の内部に上方に変形が生じることによるスラブ内地震 (図 2 右) の結果であると考えられる。これらの地震イベントは、東京の地下 10-100 km の間でマグニチュード 5 から 6 程度の地震が発生する可能性があることを示す (例えば Okada and Kasahara, 1987)²⁾。

本年度は、スラブ同士の相互作用を概念的に理解するために、ジオダイナミクス・モデルを構築した。このモデルは必ずしも PAC および PHS とは合致しないものの、スラブどうしの衝突によって片方のスラブの内部の応力が増加する様式をよりよく理解する一助になる。

3) 沈み込むスラブの解析のための力学的なコード

本研究では、粘性・粘塑性・弾塑性・粘弾塑性のレオロジーをもつ物質の変形を計算するジオダイナミクスのコードを使用した。このコードはテキサス大学地球物理学研究所の Luc Lavier と Eh Tan が開発したものである。このコードの利点は、(1) リソスフェアの変形を研究するために開発されたこと、(2) スラブの沈み込みの時間進展が計算できること、(3) 本コードは (a) 弾性変形、(b) クリープ則を用いた粘性 (塑性流動)、(c) モール・クーロンの塑性流動、(d) 浸食や断層帯などの弱線、などを再現することが出来る。また、(4) 本コードはほかのオープンソースのコードに比べて容易に扱うことが出来る、(5) コードの作者である Lavier 教授自身がこのコードを使って大陸の伸張や沈み込み帯における島弧の衝突について研究を行っておりノウハウを享受できる、といった利点もある。

4) スラブがもう一つのスラブと衝突しながら沈み込む場合のモデル

片方のスラブがもう一方のスラブと衝突する現象を理解するために、3通りのジオダイナミクス・モデルを考えた(図3)。最初の2つのモデルは、異なる熱年代および厚さをもつスラブを使って、2枚のプレートモデルを考える。もう一つのモデルは、3枚のプレートによる系であり、最初の二つのモデルで用いたスラブがお互いの方向に向かって沈み込むモデルである。

最初のモデルAでは、海洋および大陸プレートを考える(図3A)。海洋プレートは玄武岩質の地殻とかんらん石からなるマントル・リソスフェアで構成され、熱年代は4000万年前である。この熱年代は、リソスフェアの厚さと温度構造を支配する。また、海洋・大陸プレートの境界には、沈み込みを開始させるために小さな塑性的な弱面が存在するとする。海洋プレートは右側から沈み込むとする。

二つ目のモデルBでは、モデルAと同様の組成および物理的特性を持つ海洋および大陸プレートを考える(図3B)。ただし、海洋プレートの熱年代は1億1000万年前とし、海洋プレートはより厚く冷たいことになる。モデルAと同様に海洋・大陸プレートの境界に沈み込みを開始させるための塑性的弱面を置き、モデルAとは逆に左から沈み込みを開始する。

三つ目のモデルC(図3C)では、モデルAおよびBで用いた海洋プレートが共に存在するとし、大陸プレートとあわせて3枚のプレートによって構成される系を考える。2枚の海洋プレートは逆の方向に、互いに向かって沈み込む。

初期条件および境界条件はいずれのモデルも共通である。領域の上面および下面の温度はそれぞれ0 および1000 である。地殻内の放射性元素による発熱はあるものとする。領域左側面は左 右の方向に年間5 cmの速度をもち、領域右側面は右 左の方向に年間10 cmの速度をもつものとする。収束速度は速いが、これによって計算時間を短くすることができる。地表面における浸食作用は生じるものとする。浸食された碎屑物の物理的特性は相転位によって母岩とは異なっている。玄武岩・蛇紋岩・エクロジャイトの相転移は適当な温度・圧力条件で生じるものとする。

それぞれのモデルについて、500万年間について計算を行った。各モデルの初期条件は60万年で平衡状態に達し、その後、両側の速度条件を適用する。計算コードはおよそ950万回の計算ステップが必要であり、中央演算処理装置としてIntel Xeon X5550 プロセッサを搭載し主記憶容量12GBのLinux 計算機を用いた計算時間はそれぞれのモデルについて27時間である。

a)モデルA

モデルAの初期条件は図4の通りである。また時間0におけるプレートの配置を図3Aに示す。ここでは、それぞれの岩石について、弾性・塑性・粘性的なレオロジーを記述する20以上の物理的性質をモデルに組み込んである。図4では、重要な物理的性質の値と空間的形狀について示してある。リソスフェアの厚さは温度の図で約1000 の色表示でおおよそ示される。また、沈降する箇所は密度と粘性の構造によって示される。

時間 0 では、モデルはアイソスタシーに達しておらず地形の高度は 0 m で一定である。本コードでは変形開始前から計算を始めることが可能であり、モデルがアイソスタシーに達する「待ち時間」を導入することができる。図 4 右は、60 万年の「待ち時間」後の状態を示している。地形断面図をみると、大陸プレートの領域では地形が高くなるのに対して、海洋プレートの部分では逆に地形が低くなることがわかる。また、密度構造をみると、大陸プレートでは海洋プレートに比べて密度が小さくなっている。この 60 万年に達して以降、側面の速度に関する境界条件を与えることで、変形の計算を始めることができる。

b) モデル B

モデル B の初期条件は図 5 左の通りである。時間 0 では、モデルはアイソスタシーに達しておらず地形の高度は 0 m で一定である。図 5 右は、60 万年の「待ち時間」後の状態を示している。モデル A と同様に、大陸プレートの領域では地形が高く、海洋プレートの部分では地形が低くなる。また、密度構造もモデル A と同様に大陸プレートでは海洋プレートに比べて密度が小さくなっている。この 60 万年に達して以降、側面の速度に関する境界条件を与えることで、変形の計算を始めることができる。

c) モデル C

モデル C の初期条件は図 6 左の通りである。2 つの海洋プレートがお互いの方向にむかって沈み込む。60 万年の「待ち時間」の後、モデル A、B と同様に大陸プレートの領域では地形が高く、海洋プレートの部分では地形が低くなる。この 60 万年に達して以降、側面の速度に関する境界条件を与え、変形の計算を始める。

5) 結果

図 7 に 3 つのモデルの結果を示す。ここでは 250 万年経過した状態を示す。プレート 2 枚であるモデル A、B では、それぞれの海洋性リソスフェアはスラブとして大陸プレートの地下に沈み込んでいる。応力の第二不変量を見ると、スラブの先端はいずれも応力は小さい。また 1 億 1000 万年の年代のスラブの応力第二不変量は 2 条の帯状分布を示す。

2 枚のスラブが存在するモデル C の場合、スラブがお互いに影響し合う。スラブが 2 枚存在することによって、アセノスフェリック・マントルの条件が変化する。ここでは、1 億 1000 万年前のスラブは単独（モデル B）の場合に比べて沈み込み量が小さいことがわかる。また、両方のスラブの先端が近づいていくことがわかる。

300 万年後では、スラブどうしがほとんど接触することがわかる（図 8）。1 億 1000 万年前のスラブ先端が 4000 万年前のスラブに非常に近接する場所では、応力が増加する。また、スラブの近接する箇所から上方にかけて、スラブ内応力はそれぞれ増加する。このことを地震活動に適用すると、関東地下で発生するスラブ先端と上方延長の地震活動は、このような 2 枚のスラブの近接地点およびその上方延長におけるスラブ内応力の増加によって発生していると考えられる。

(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して、関東直下を模擬した数値実験を行った。今後は、特にスラブの形状・相対的な物理的性質・相対運動に着目して、スラブどうしの衝突のモデリングを改良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と地震活動について、明らかにしていく必要がある。

(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, Geophys. Res. Letts., 34, L18301, doi:10.1029/2007GL30763, 2007.
- 2) 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.

(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 23 年度業務計画案

フィリピン海プレート北縁の運動と上盤プレート・太平洋スラブの相互作用について数値実験を行い、フィリピン海スラブの地殻・変形パターンを解析する。とくに、スラブの形状・スラブ間の相対的な物性・相対的な運動速度などについて、より詳細な検討を行い、現実的なスラブ相互作用に伴うスラブの変形について検討する。

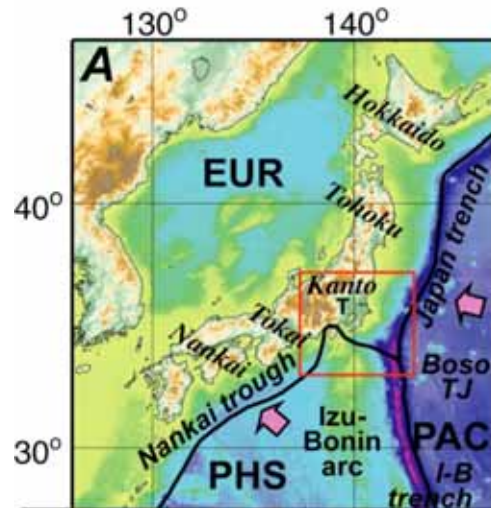


図 1 . 本州と房総三重会合点の位置。太平洋プレート (PAC)、フィリピン海プレート (PHS)、ユーラシアプレート (EUR)。三重会合点 (TJ) は関東の東方に位置する。

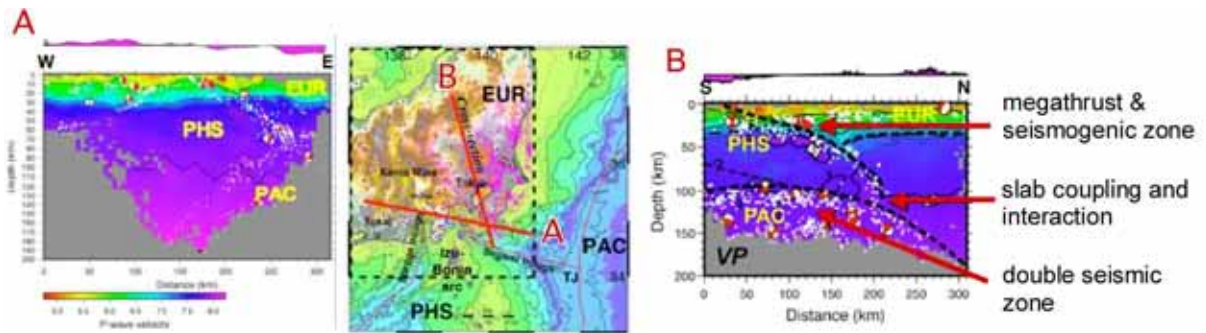


図 2 . 関東の地震波トモグラフィ (Wu et al., 2007) ¹⁾ と 地震活動は力の釣り合い解析に対して観測結果からの拘束を与える。赤線で示した A 断面は左側の図面と対応しており、図 3 (C) の概念図に相当する。

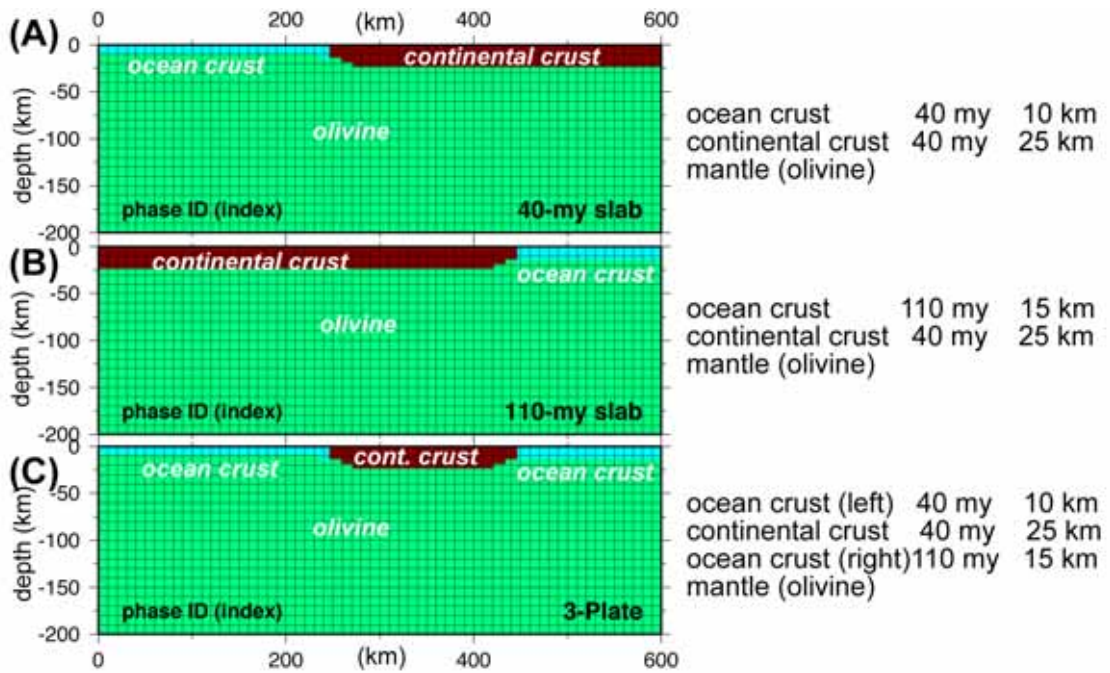


図3 スラブどうしの相互作用のジオダイナミクス・モデル。

(A)若い海洋プレートが右側に向かって大陸プレートの下に沈み込む場合。

(B)古い海洋プレートが左側に向かって大陸プレートの下に沈み込む場合。

(C)新旧の海洋プレートがその間の大陸プレートの下に沈み込む場合。

熱年代と地殻の厚さは右のコラムの通り。モデル A および B は 2 つのプレートで構成される沈み込み帯であり、その解析結果は 3 つのプレートで構成される沈み込み帯であるモデル C と比較検討し、両者の相違点からスラブ間相互作用を検討する。

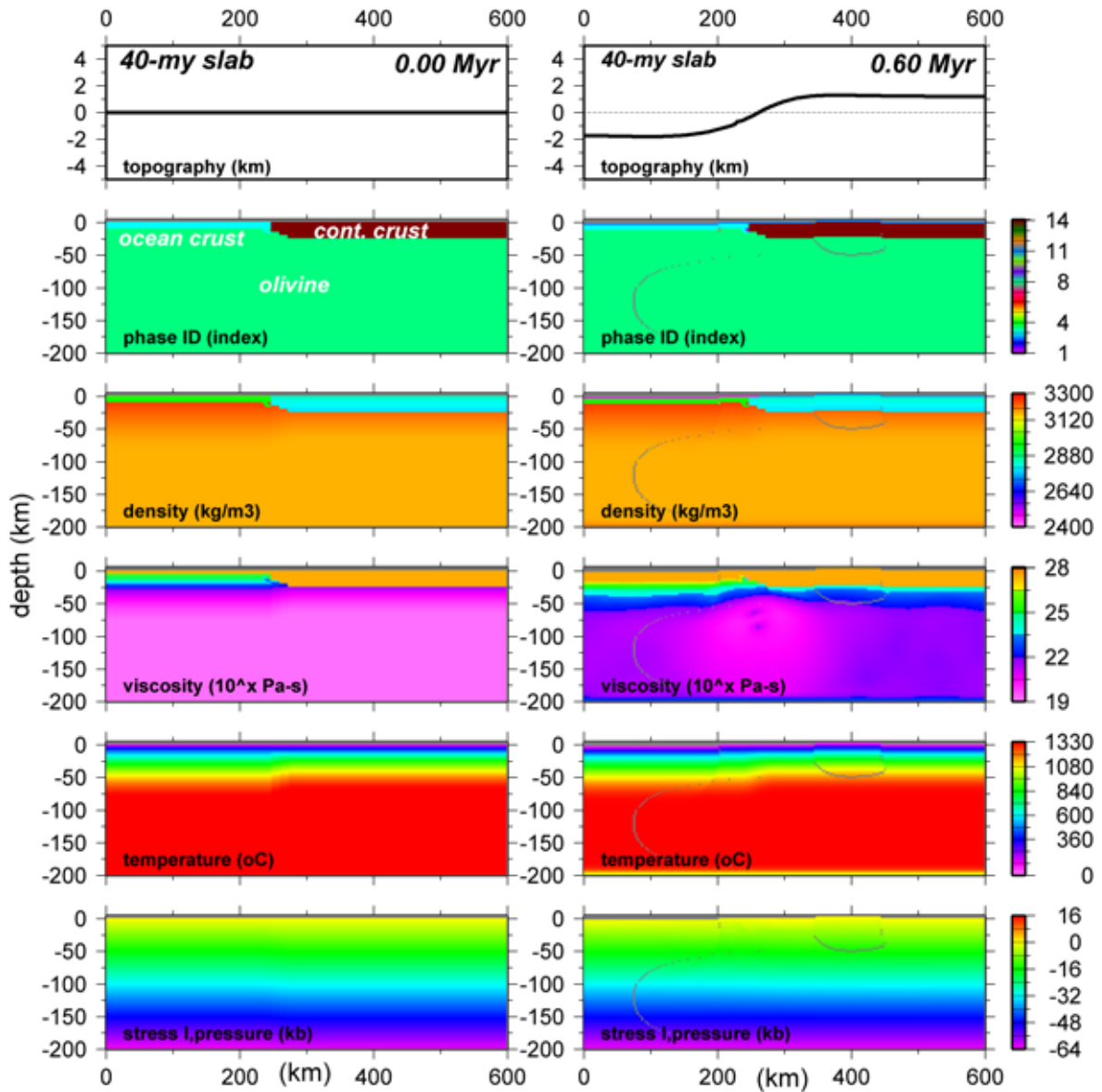


図4 モデルA(年代が4000万年前の海洋プレート)の初期条件。それぞれのプロットは物理的性質と状態変数の空間分布を示す。左側は経過時間0における初期条件を、右側は60万年経過時点の状態を示す。計算開始時点のモデル(左図)はアイソスタシーを実現するために設ける。60万年間でアイソスタシーによって大陸および海洋に地形が発達することに注意。

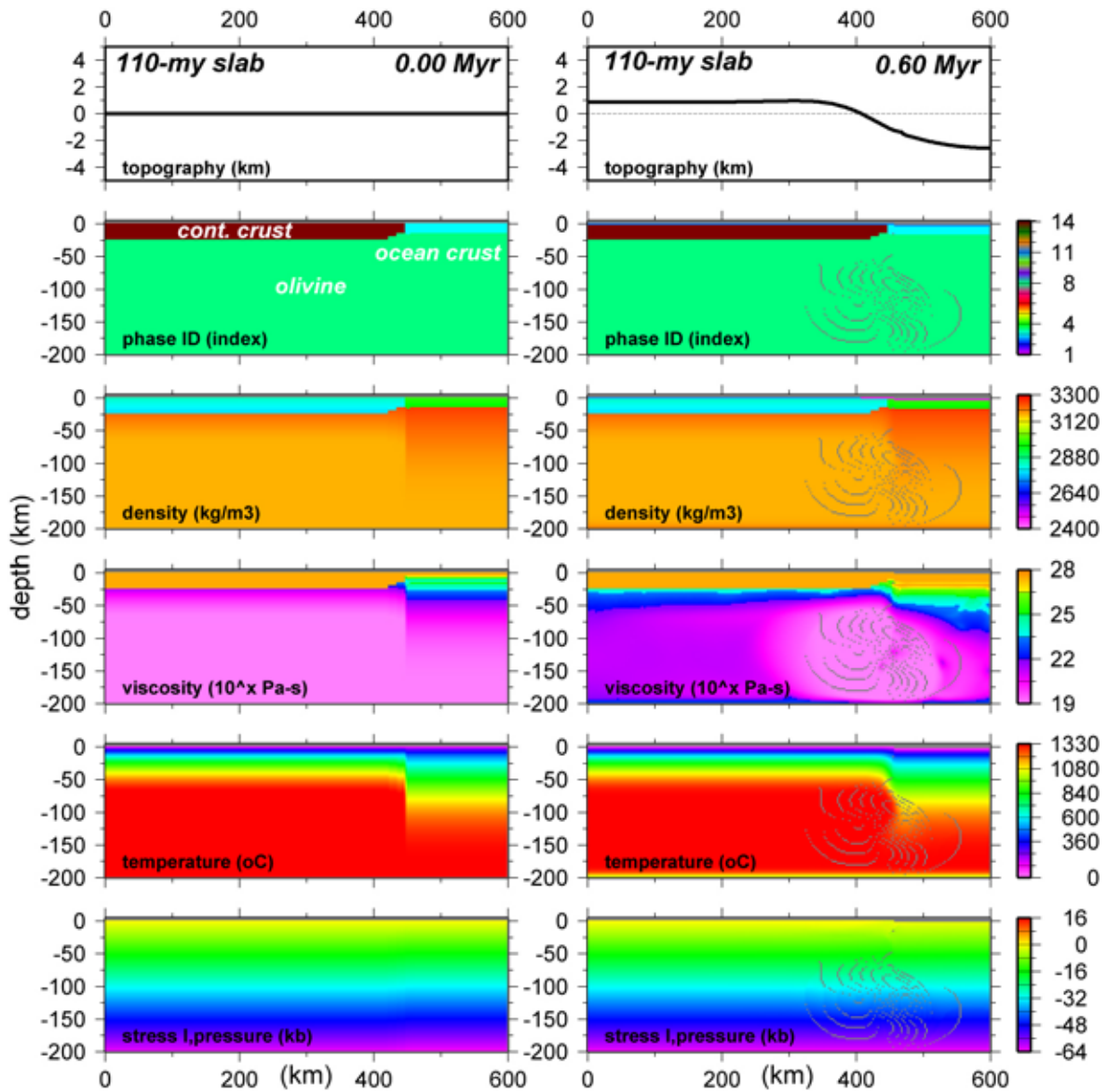


図 5 モデル B (年代が 1 億 1000 万年前の海洋プレート) の初期条件。それぞれのプロットは物理的性質と状態変数の空間分布を示す。左側は経過時間 0 における初期条件を、右側は 60 万年経過時点の状態を示す。計算開始時点のモデル (左図) はアイソスタシーを実現するために設ける。60 万年間でアイソスタシーによって大陸および海洋に地形が発達することに注意。

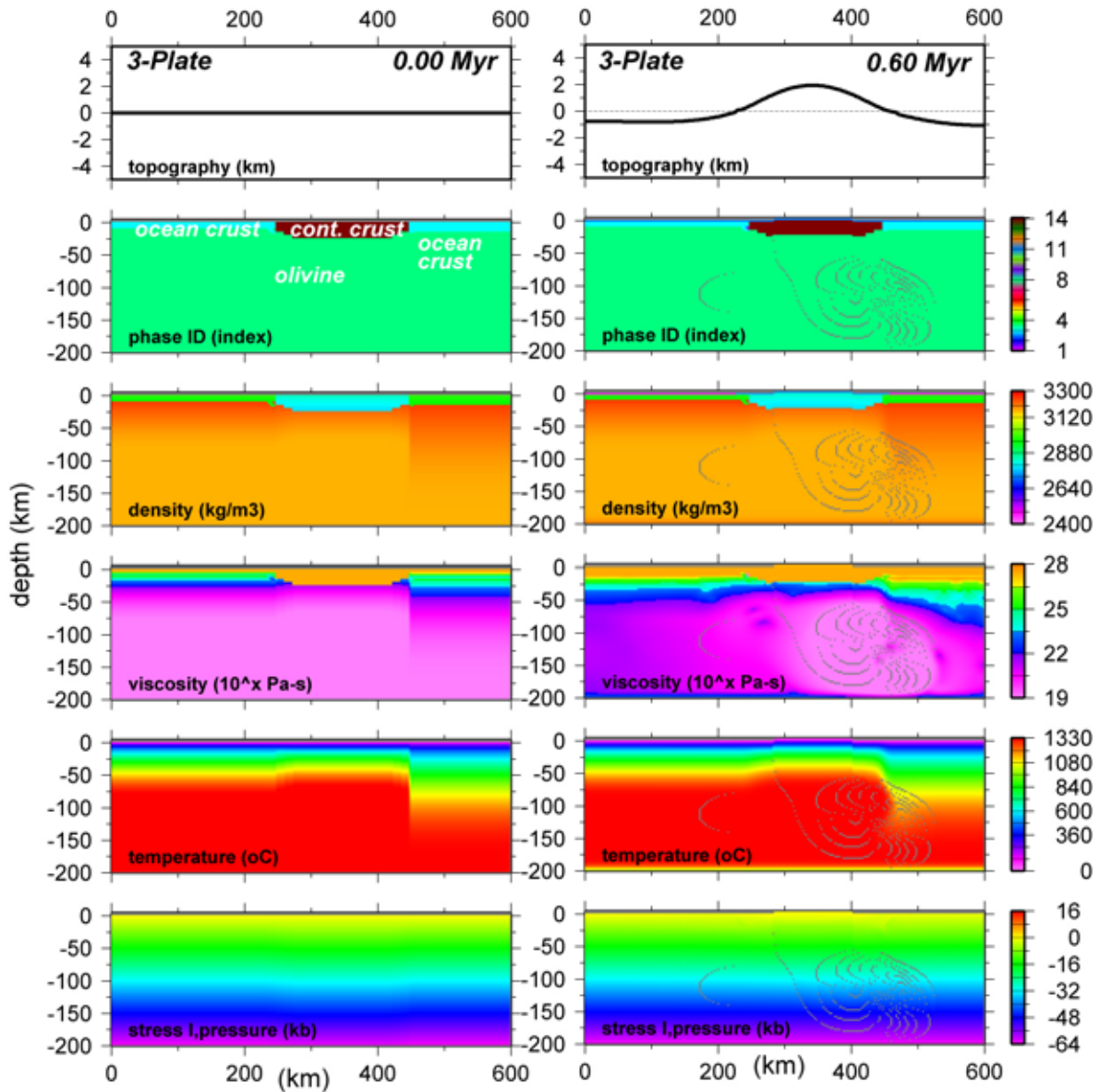


図6 モデルC (年代の異なるスラブが互いの方向に沈み込む) の初期条件。それぞれのプロットは物理的性質と状態変数の空間分布を示す。左側は経過時間0における初期条件を、右側は60万年経過時点の状態を示す。計算開始時点のモデル(左図)はアイソスタシーを実現するために設ける。60万年間でアイソスタシーによって大陸および海洋に地形が発達することに注意。

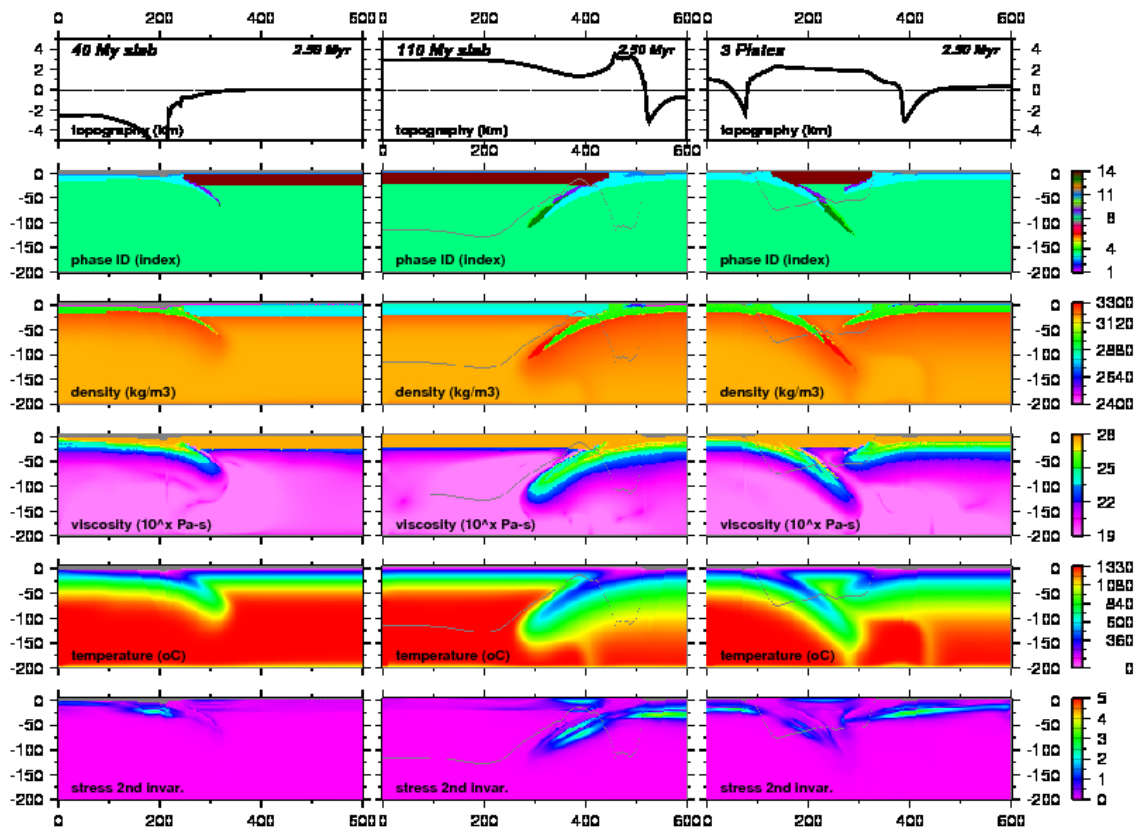


図7 250万年経過時点での3つのモデルの比較。左のコラムがモデルA(4000万年前の海洋プレート)、真ん中のコラムがモデルB(1億1000万年前の海洋プレート)、右側がモデルC(3つのプレート)を示す。スラブが一つの場合、通常の沈み込みが進行する。また、応力の第二不変量は応力が増加する部分を示す。モデルCにおいても、スラブどうしはまだ接触しておらず、それぞれのスラブ内の応力は小さい。

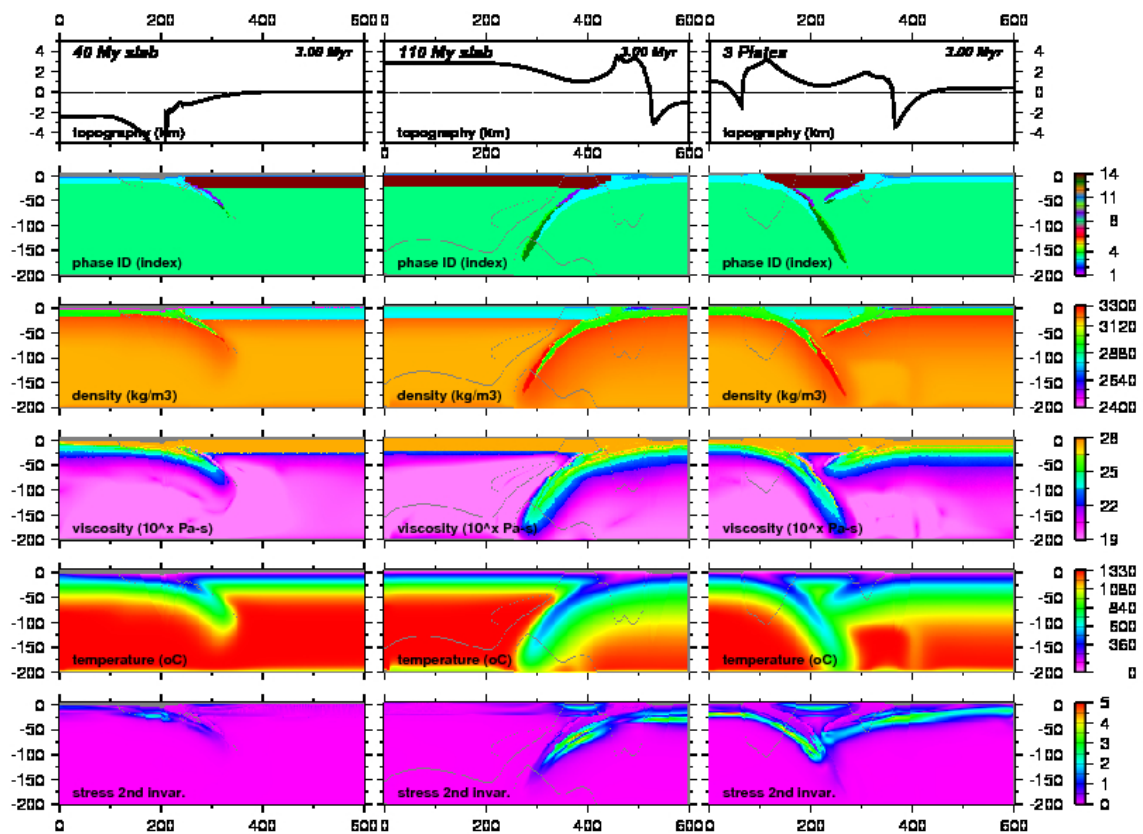


図 8 300 万年経過時点での 3 つのモデルの比較。左のコラムがモデル A (4000 万年前の海洋プレート)、真ん中のコラムがモデル B (1 億 1000 万年前の海洋プレート)、右側がモデル C (3 つのプレート) を示す。モデル C では、スラブ先端はほぼ接触している。応力の第二不変量は、スラブどうしが接触することによってスラブ内応力が増加していることを示しており、スラブが一つの場合と対照的である。また、大陸地殻では堆積盆が形成されている。