

論文内容の要旨

論文題目 Fluidmechanical modeling of plate boundaries
to simulate mantle convection with plate-like motion as its top

(表面の運動がプレートライクなマンテル対流実現のためのプレート境界の流体力学的なモデルリング)

氏 名 高 久 真 生

1. イントロダクション

1960年代後半に提唱されたプレートテクトニクス理論により地球表面の運動は運動学的に表現され、表面のさまざまな特徴が説明されてきた。さらにプレート運動を地球の冷却に伴うマンテル対流の表層運動として、力学的な理解が試みられてきたが、未だ観測を説明するようなモデルは得られていない。マンテル対流は主に熱対流であるが、地球内部の密度異常分布を直接モデルに与える密度異常駆動対流は結果と観測との比較がしやすい利点がある。地球内部の主な質量異常はスラブであると考えられている。しかし、スラブの質量異常を与える対流モデルでは表面での活発なプレートライクな運動を再現することができていない。本研究では2次元の定常的な密度異常駆動対流を解析的に計算し、プレート境界を地震学の震源理論を用いて流体力学的にモデル化することにより、表面の運動がプレートライクであるようなマンテル対流を得ることを目指した。

2. 表層中のプレートライクな運動実現のための困難

プレートは地質学的時間スケールにおいて 10^{23} Pa s 以上の高粘性表層として振る舞い、アセノスフェアの粘性率に比べ3桁以上大きいと考えられている。水平方向に均質な場合にプレートライクな高粘性表層の流れを実現するためには以下のような3つの代表的な困難がある。

- I. 表層の運動はマンテル対流から分離してしまい、高粘性表層中の流れがマンテル対流の一部として表現できない。
- II. 観測では表面速度の *poroidal component* と *toroidal component* の運動エネルギー比は約1であるが、密度異常駆動対流は *toroidal component* を含まない。
- III. 実際は非対称な沈み込みであるが、密度異常駆動対流の下降流は一般に対称である。

さらに、周囲のアセノスフェアと粘性率が同程度のスラブをおくと、スラブ質量異常による負の浮力がスラブに直接繋がっている表層に十分に伝わらず、観測に合うような活発な表層運動が生じない。

3. モデル化

以上の困難解決のためにプレート境界とスラブのモデル化を行った。

プレート境界の3要素(海嶺、海溝、トランスフォーム断層)を地震学の震源理論における等価体積力の概念を用いて、プレート境界における速度の食い違いによって生じる流れを *double couple* による流れとして表現した。さらに、スラブの負の浮力による流れを *vertical single force* による流れとして表現した。*Single force*, *double couple* による流れは高粘性非圧縮流体の運動方程式の特殊解である。等価体積力を用いたモデル化により、グローバルな視点からのプレート境界における流れ場とスラブ質量異常による流れ場を表現できた。

① プレート境界のモデル化

プレート境界を表層中に初めから存在する切れ目とし、定常運動がおきているとした。海嶺、対称な沈み込みの海溝、片側沈み込みの海溝、トランスフォーム断層をモデル化した。海嶺を *horizontal tensile fault* (図 1a)、対称な沈み込みの海溝を

共役な 45 度 dip の reverse fault (図 1a の流れの向きの反対のもの)、片側沈み込みの海溝を 45 度 dip の reverse fault と断層面に垂直な single force を用いて表現した (図 1b)。ただし、表面の free-slip の境界条件を満たすために、 $z < 0$ の領域に鏡像を置いた。また、トランスフォーム断層を横ずれ断層として表現した (図 1c)。さらに、プレート境界の役割を仮定し、ストレスを解消する場所とした。海溝を断層面上の摩擦が 0 の場所として、スラスト面上の shear stress が解消されるとした。他方、海嶺を tensile stress に対する強度が 0 の場所として、水平方向の tensile stress が解消されるとした。

② スラブのモデル化

スラブはプレートと繋がっているとして、プレートとスラブの粘性を同程度とした。解析的な取り扱いのため、水平方向の粘性率を一様とする必要があるため、スラブの全質量をプレート下面に集中させた質量異常面として表現した (図 1d)。

③ 2次元の定常的な密度異常駆動対流のモデル化

本研究では 1. の困難に注目して、海嶺、海溝、スラブを含む対流系を考えた。モデルの単純化のために海溝における沈み込みを対称であるとした。密度異常駆動対流モデルは高粘性表層とアセノスフェアの上下 2 層からなる半無限媒体の表層中に海嶺、海溝を周期的においた構成とした (図 2)。質量保存の方程式と高粘性非圧縮流体の Navier-Stokes の方程式を解き、表面で free-slip、表層下面で速度とトラクション連続の境界条件をおいた。ただし、粘性比 $r = \eta_1 / \eta_2$ とする。高粘性非圧縮流体の運動方程式の線形性から、スラブ質量異常、海溝における reverse fault system、海嶺における normal-fault system の各々が駆動する対流に分け、それぞれを個別に計算した。与えられた大きさのスラブ質量異常が駆動する対流に対して①で述べたストレス条件を満たすように海溝の reverse fault system、海嶺の normal fault system の各々のモーメント α, β を重みとして (式 (1), (2))、3 種の対流を重ね合わせた。海嶺、海溝における断層の交点 ($y=0, L/2$) を代表点として、ストレス条件はこの代表点で求めた。各々の要素が駆動する対流に分けることで、それらのプレートライクな運動実現への寄与を考察できる点が本研究の特徴である。

$$\text{海溝において: } \frac{\sigma_{zz}^{slab} - \sigma_{yy}^{slab}}{2} + \alpha \frac{\sigma_{zz}^{trench} - \sigma_{yy}^{trench}}{2} + \beta \frac{\sigma_{zz}^{ridge} - \sigma_{yy}^{ridge}}{2} = 0 \quad \dots (1)$$

$$\text{海嶺において: } \sigma_{yy}^{slab} + \alpha \sigma_{yy}^{trench} + \beta \sigma_{yy}^{ridge} = 0 \quad \dots (2)$$

4. 結果

ストレス: 高粘性表層 (粘性比 $r=1000$) においてスラブ質量異常の駆動する対流の表面におけるストレス (図 3a) は海溝付近で鉛直方向の tensile stress が卓越し、海溝から離れると水平方向の tensile stress が卓越する。海溝断層の駆動する対流の表面におけるストレス (図 3b) は鉛直方向の tensile stress はほぼ 0 となり、水平方向の tensile stress は水平方向に一様になった。また粘性比が十分高い場合、重ね合わせた対流の表面におけるストレス (図 4) と表面地形は表層の粘性率に依存しなくなる。水平方向の tensile stress は伸張となった (海溝付近で最大、海嶺でゼロ)。表面速度が実際のプレート速度と同程度となるためには、スラブの負の浮力: 50 MPa, アセノスフェアの粘性: 2×10^{19} Pa s, 表層の厚さ: 100 km が必要であり、またこのとき地形は海溝で 2 km となり、何れもこれまでの観測や推定と矛盾しない。

表層の流れ: 重ね合わせた対流は表層とアセノスフェアの粘性比 $r > 1000$ の場合に表層の運動はプレートライクになった。粘性比 $r=1000$ のときの流線関数は図 5 のようになった。 $0 < z < W$ の表層の流れは速度が一様になりプレートライクな表層運動が実現した (図 6)。表面速度は海嶺の位置によらず、速度 (無次元) はほぼ一様になった。また、表層の運動がプレートライクな場合の次元化した表面速度は約 10 cm/yr となった。以上の結果はプレート速度の観測事実と一致し、本研究におけるモデルリングは妥当である。さらに重要な結果として表面速度は粘性比によらず一定となった。つまり、表面速度はアセノスフェアの粘性率とスラブの負の浮力の大きさのみにより、表層の粘性率によらない。

5. 考察

スラブの負の浮力の見積もり: スラブが長さ 300-600 km, 密度異常 100 kg/m^3 の場合にスラブの鉛直方向の tensile stress は 300-600 MPa、即ち岩石の破壊強度 (~ 500 MPa) 程度となり、これがスラブの負の浮力の見積もりの最大値を与える。一方、最小見積もりとしては地震の平均的なストレスドロップ程度の値 (3-6 MPa) が考えられる。本研究においては地震時のアスペリティにおけるストレスドロップ程度の値 (30-60 MPa) をスラブ負浮力の最も代表的な値として採用した。スラブの負の浮力が 50 MPa のとき、表面における水平方向の tensile stress は 25-50 MPa となり、リッジプッシュと反対符号で大きさは同程度となる。

力のバランス: 本モデルでは、スラブの密度異常を高粘性表層下面に分布させた質量異常面としスラブのみが駆動源となっている。高粘性表層の厚さは一定のため ridge push はない。スラブの負の浮力の大部分は海嶺と海溝における水平・鉛直方向の流れの出入りに伴う抵抗と釣りあっており、残りのわずかな部分が表層下面におけるマントルドラッグの和と釣り合っている。

プレート境界の役割: 本研究においてはプレート境界の役割をストレス解消の場所として定義し、スラブ質量異常、海溝の reverse fault system、海嶺の normal fault system の駆動する対流を重ね合わせた。重ね合わせの条件とプレート境界の表層の流れに及ぼす影響を考察することで、スラブ質量異常によって高粘性表層にできたストレスを海溝と海嶺が相補的に解消することにより、マントル対流の一部として高粘性表層に活発な流れが起こると理解できる。

6. 結論

プレート境界における流れ場と高粘性なスラブの質量異常を地震学の震源理論の等価体積力の概念を用いて表現した。さらに、プレート境界をストレスの解消される場所としてモデル化することにより、表層の運動がプレートライクで、自己矛盾のない

質量異常駆動対流を実現できた。観測に合った表面速度、表面地形などが得られた。対流を要素に分けることにより、プレート境界の役割を明らかにして、プレート運動の大まかな力学的枠組みを理解できた。

Figure 1 Stream lines or equi-velocity contours of the flow in the homogeneous half space. Dashed lines are clockwise-directed and solid lines counterclockwise-directed. a) Stream lines of the flow due to normal faulting at ridge. A conjugate set of 45°-dip slip faults extends down to depth W below the free-slip surface in a homogeneous half space. Dashed lines are clockwise-directed and solid lines counterclockwise-directed. The flow direction is reversed in the case of symmetric trench. b) Stream lines of the flow due to distributed single forces normal to the 45°-dip fault plane at a one-sided trench. The fault extends down to depth W in a homogeneous half space. Dashed lines are clockwise-directed. The counterpart of this source is located very far away to the right. Flow crosses the fault plane from the foot wall side well into the hanging wall side. c) Equi-velocity contours of the flow due to left-lateral strike-slip faulting along transform fault. The source extends down to depth W below the free-slip surface in a homogeneous half space. Solid and dashed lines indicate the positive and negative along-strike velocities, respectively. d) Stream lines of the flow due to an infinitesimally short slab of width $2W$. The source is placed at depth W below the free-slip surface in a homogeneous half space.

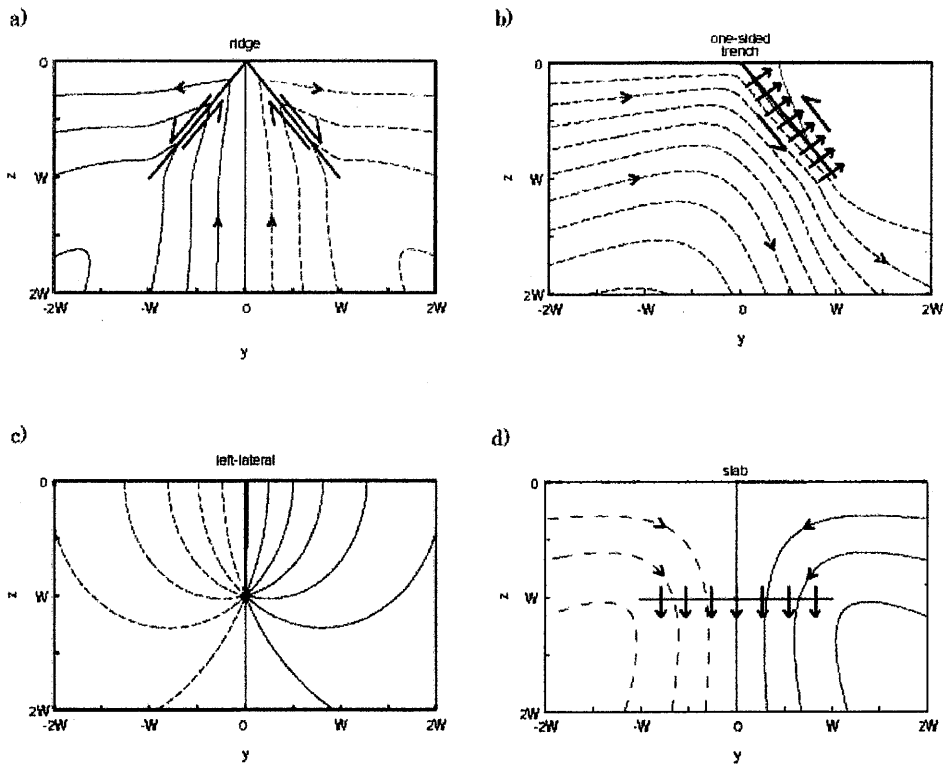


Figure 2 Profiles of horizontal (solid lines) and vertical tensile stresses (dashed lines) along the surface ($z=0$) in a case of large viscosity ratio ($\eta=1000$). Trench-to-trench distance L is $40.96W$. a) stresses due to the flow driven by the slab excess mass with force density f_0 normalized by $|f_0|$. b) stresses due to flow driven by faulting at trench with moment density m_0 , normalized by $|m_0|/W$. Faults are spaced periodically at interval L .

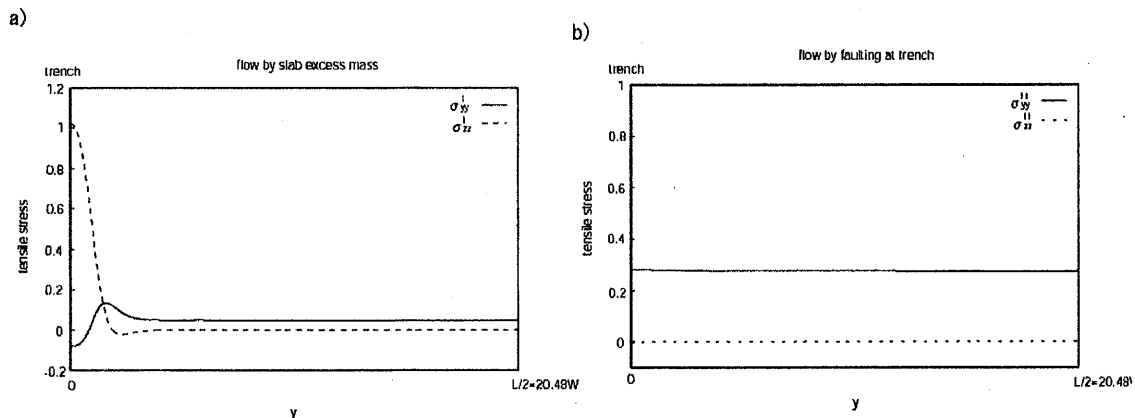


Figure 3 Two-dimensional model configuration of convection system with faults at ridges and trenches within the highly viscous surface layer. The highly viscous subducting slab is attached to the bottom of the surface layer.

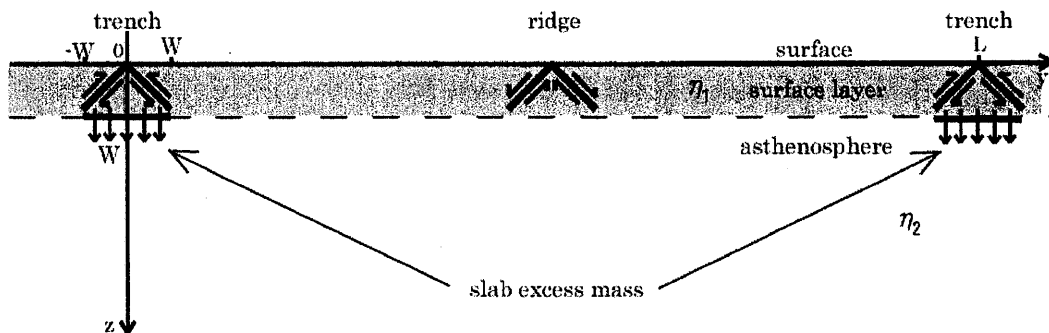


Figure 4 Profiles of horizontal and vertical tensile stresses along the surface ($z=0$), normalized by f_0 , of the coupled convection with viscosity ratio $r=10^3$.

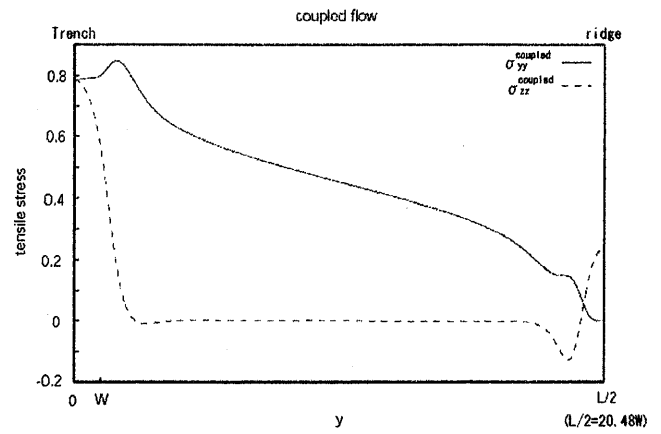


Figure 5 Stream function, normalized by $|f_0|W / \eta_1$, of the coupled convection with viscosity ratio r . The contour interval is 50, 500, 5000 for cases (a), (b) and (c) where $r=10^3, 10^4, 10^5$. Subducting slabs are placed at an interval $L(=40.96W)$. The vertical scale is exaggerated. Dashed and solid stream lines direct clockwise and counterclockwise, respectively. Hashed layer means highly viscous surface layer.

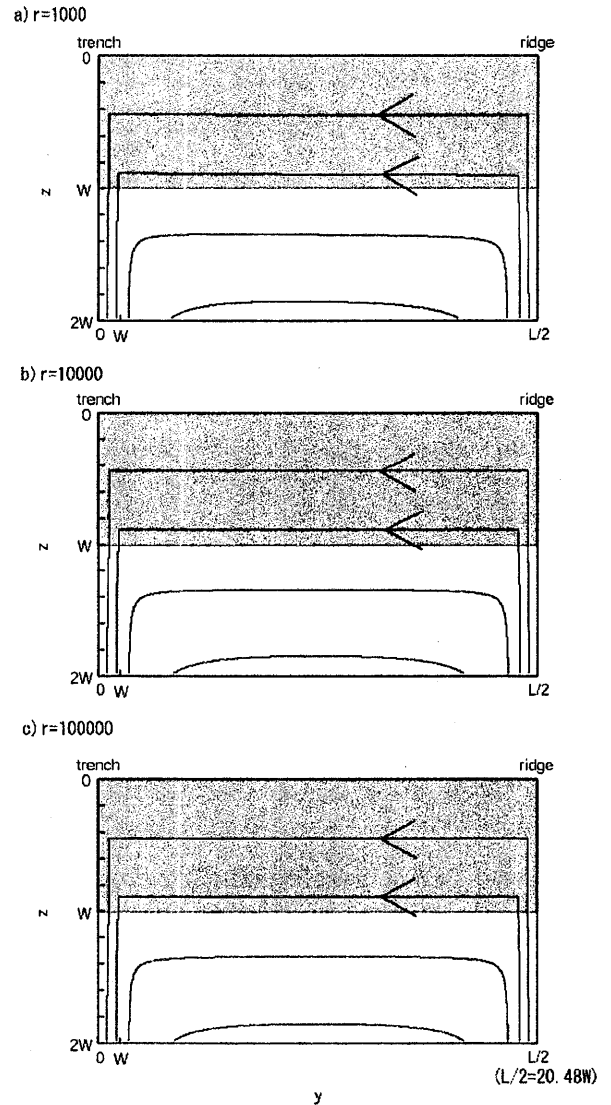


Figure 6 Profile of surface horizontal velocity, normalized by $|f_0|W / \eta_1$, of the coupled convection with viscosity ratio $r=1000$. Trench-to-trench distance L is $40.96W$. A ridge is placed either at the symmetric position ($y=0.5L$) or at an asymmetric position ($y=0.7L$). In the latter case ridges are located at $y=..., -1.3L, -0.7L, 0.7L, 1.3L, ...$

