

プレートテクトニクスを超えて：地球表層ダイナミクスのスキン・フロー・モデル

夏 恒治 博士による原概念に基づく

原理論リポジトリ: <https://github.com/Airlo-Science/skin-flow-earth-theory>

2025年8月

要旨

我々は、従来のプレートテクトニクス・パラダイムを超えた、地球表層ダイナミクスを理解するための新しい概念的枠組みを提案する。スキン・フロー地球理論（Skin-Flow Earth Theory: SFET）は、地球の地殻を剛体プレートとしてではなく、下部のマントル流動に応答して連続的に変形する薄い不均質な「表皮（スキン）」として概念化する。この視点では、見かけ上のプレート境界を、基本的な力学的不連続面ではなく、応力集中帯として扱う。我々は、表層テクトニクスは、リソスフェアの力学的性質と潮汐力・自転効果を含む外部力によって変調された、深部マントルダイナミクスの表現として理解すべきであると主張する。この枠組みは、プレート内変形、拡散的プレート境界、および深部地球と表層プロセスの結合について新しい洞察を提供する。

キーワード：地球ダイナミクス、マントル対流、リソスフェア変形、代替テクトニクス、連続体力学

1. はじめに

プレートテクトニクス理論は、半世紀以上にわたって地球科学における支配的なパラダイムであった。多くの地質現象を説明することに著しく成功している一方で、剛体プレートの枠組みでは説明が困難な観測事実がいくつか残されている：

- 拡散的変形帯 - チベット高原や米国西部のような広域は、剛体プレートの挙動と矛盾する分散した変形を示す
- プレート内地震 - プレート境界から遠く離れた場所で重要な地震活動が発生する（例：米国ニューマドリッド、インド・カッチ）
- 時間依存的なプレート運動 - GPS観測は複雑で時間変化する変形パターンを明らかにしている
- 深発地震の分布 - 地震活動パターンは、しばしば平面的なゾーンではなく連続的な分布を示す

これらの観測は、地球表層の挙動が剛体運動学よりも連続体力学モデルによってより良く記述される可能性を示唆している。ここで我々は、これらの制限に対処しながら、確立された観測事実との互換性を維持する代替的枠組みとして、スキン・フロー地球理論（SFET）を提案する。

2. 理論的基礎

2.1 基本前提

SFETは4つの基本的前提に基づいている：

- 「スキン」としての地殻 - 地球の地殻は、連続的に変形するマントル上に浮かぶ、冷却された脆性-延性層を表す
- 連続的変形 - 表面変形は離散的な境界に集中するのではなく連続的である
- マントル流動の優位性 - 表面運動は主にマントル対流によって駆動され、プレート相互作用によるものではない
- マルチスケール結合 - 地球ダイナミクスは時間的（ 10^0 - 10^8 年）および空間的（ 10^0 - 10^4 km）スケールにわたる結合を含む

2.2 数学的枠組み

我々は、薄い弾塑性蓋を持つ成層粘性流体として、結合偏微分方程式を用いて地球システムを記述する：

マントルダイナミクス：

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \sigma_m + \rho_m g &= 0 \\ \sigma_m &= -pI + \mu_m (\nabla v + \nabla v^T) \\ \nabla \cdot v &= 0\end{aligned}$$

地殻力学：

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \sigma_c + \rho_c g + f_c &= 0 \\ \sigma_c &= C : \varepsilon \quad (\text{弾性領域}) \\ \sigma_c &= \sigma_y + \eta (\nabla v + \nabla v^T) \quad (\text{塑性領域})\end{aligned}$$

ここで、結合は地殻-マントル界面での速度と応力の連続性を通じて生じる。

2.3 プレートテクトニクスとの相違

側面	プレートテクトニクス	SFET
リソスフェア	剛体プレート	変形可能なスキン
境界	離散的、狭い	拡散的、創発的
駆動力	海嶺の押し、スラブの引き	マントル流動パターン
変形	境界集中型	連続分布型
予測の焦点	プレート運動	応力/歪み場

3. 観測可能な予測

SFETは、古典的なプレートテクトニクスと区別されるいくつかの検証可能な予測を行う：

3.1 地震活動パターン

予測：地震分布は、離散的な境界線に従うのではなく、マントル流速の勾配と相関すべきである。

検証：地震トモグラフィーから導出されたマントル流動モデルに対する全球地震活動の統計分析。

3.2 地表速度場

予測：GPS速度は、脆性地殻が破壊する場所を除いて、連続的な空間微分を示すべきである。

検証：高解像度GPSアレイは「プレート内部」で滑らかな速度勾配を明らかにすべきである。

3.3 時間的変動

予測：地表変形速度は、マントル対流パターンに対応する複数の時間スケールで変動すべきである。

検証：10年スケールのGPS時系列は、深部マントル構造と相関する系統的な変動を示すべきである。

4. ケーススタディ

4.1 ヒマラヤ造山帯

従来の見解：インドプレートとユーラシアプレートの衝突。

SFET解釈：収束するマントル流によって生成された圧縮応力場、地殻の肥厚は「衝突」ではなく圧縮に対するアイソスタティック応答。

裏付ける証拠：

- チベット全体にわたる分散した変形
- 連続的な変形を示す深発地震
- マントル構造における明確な「縫合線」の欠如

4.2 中央海嶺

従来の見解：新しい海洋地殻が形成される発散型プレート境界。

SFET解釈：伸張応力により表皮が自然に破断するマントル湧昇帯の表面表現。

裏付ける証拠：

- 3Dマントル流を反映する海嶺のセグメンテーション
- 分散した湧昇を示すオフアクシス火山活動
- 単一海嶺に沿った可変拡大速度

4.3 日本沈み込み帯

従来の見解：ユーラシアプレートの下に沈み込む太平洋プレート。

SFET解釈：海洋の表皮を内部に引き込む下降マントル流、「プレート境界」は最大歪み速度の表面表現。

裏付ける証拠：

- 流れ制御の下降を示唆する複雑なスラブ形状
- 背弧地域における分散した変形
- 時間変化する収束速度

5. 意義

5.1 地震災害評価

SFETは、地震災害が従来のプレート境界を超えて広がることを示唆している。連続変形場内の高歪み速度の地域は、従来の境界からの距離に関係なく、地震リスクの上昇を表す。

5.2 長期的な地質学的進化

大陸移動と山脈形成は、プレート衝突ではなく、進化するマントル流動パターンへの応答として再解釈で

きる。これは以下について新しい視点を提供する：

- 超大陸サイクル
- プレート内火山活動
- 大陸分裂

5.3 資源分布

マントル流動パターンは以下を通じて資源の分布を制御する可能性がある：

- 鉍石を含む流体の集中
- 堆積盆地の形成
- 炭化水素移動経路

6. 理論の検証

SFETを検証するための包括的な研究プログラムを提案する：

フェーズ1：データ統合（1-2年）

- グローバルGPS、地震、重力データセットのコンパイル
- 高解像度マントル流動モデルの開発
- 統合可視化プラットフォームの作成

フェーズ2：モデル開発（2-4年）

- マルチスケール数値モデルの構築
- 観測された変形に対する較正
- 具体的な予測の生成

フェーズ3：標的観測（3-5年）

- 主要地域への高密度アレイの展開
- 深部地震イメージングの実施
- 時間的変動のモニタリング

フェーズ4：統合（4-6年）

- 予測と観測の比較

- 理論構成要素の洗練または棄却
- 実用的応用の開発

7. 議論

スキン・フロー地球理論は、地球表層ダイナミクスの概念化におけるパラダイムシフトを表している。プレートテクトニクスの洞察を放棄するのではなく、SFETはそれらの上に構築しながら、その制限に対処する。主な利点は以下を含む：

- 統一的枠組み - プレート様変形と分散変形の両方を説明
- 物理的基礎 - 連続体力学と流体力学に基づく
- 予測力 - 具体的で検証可能な予測を行う
- 実用的応用 - 災害評価への新しいアプローチを提供

潜在的な批判と応答：

「GPSは明らかに剛体プレート運動を示している」

- 剛体運動はプレート内部に有効な一次近似だが、変形帯では破綻する

「地震イメージングは明確なプレート境界を示している」

- 速度コントラストは組成/熱的差異を反映し、必ずしも力学的境界ではない

「なぜ成功した理論を変更するのか」

- 科学は新しい観測を取り入れ、より大きな予測力を達成するためにモデルを洗練することで進歩する

8. 結論

スキン・フロー地球理論は、古典的なプレートテクトニクスの制限に対処しながら、その成功を維持する地球表層ダイナミクスに関する新鮮な視点を提供する。リソスフェアをマントル流によって駆動される連続的に変形する表皮として扱うことにより、SFETは以下を理解するための統一的枠組みを提供する：

- 分散した大陸変形
- プレート内地震活動
- 時間依存的な表面運動
- 深部地球-表面結合

我々は地球科学コミュニティに、これらのアイデアを批判的に検討し、予測を検証し、この枠組みの洗練

に貢献することを呼びかける。SFETが最終的にプレートテクトニクスに取って代わるか、修正するか、または棄却されるかにかかわらず、基本的な仮定に挑戦する演習は地球の動的システムの理解を前進させる。

謝辞

スキン・フロー地球理論は夏恒治博士によって最初に考案されました。この文書は、科学コミュニティの検討のために理論的枠組みを提示しています。この理論に基づくすべての研究は、夏博士を原理論者として明記する必要があります。

参考文献

1. Bercovici, D. (2003). The generation of plate tectonics from mantle convection. *Earth and Planetary Science Letters*, 205(3-4), 107-121.
 2. Bercovici, D., & Ricard, Y. (2005). Tectonic plate generation and two-phase damage: Void growth versus grain size reduction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B3).
 3. Bercovici, D., Ricard, Y., & Richards, M.A. (2000). The relation between mantle dynamics and plate tectonics: A primer. In *History and Dynamics of Global Plate Motions*, Geophysical Monograph 121, pp. 5-46.
 4. Coltice, N., & Shephard, G.E. (2018). Tectonic predictions with mantle convection models. *Geophysical Journal International*, 213(1), 16-29.
 5. Gordon, R.G. (1998). The plate tectonic approximation: Plate nonrigidity, diffuse plate boundaries, and global plate reconstructions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1), 615-642.
 6. Gordon, R.G., & Stein, S. (1992). Global tectonics and space geodesy. *Science*, 256(5055), 333-342.
 7. Thatcher, W. (2009). How the continents deform: The evidence from tectonic geodesy. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 237-262.
 8. Zatman, S., Gordon, R.G., & Mutnuri, K. (2005). Dynamics of diffuse oceanic plate boundaries: Insensitivity to rheology. *Geophysical Journal International*, 162(1), 239-248.
-

著者情報

原理論者：夏 恒治 博士

連絡先：natchi@symphony.plala.or.jp

リポジトリ：<https://github.com/Airlo-Science/skin-flow-earth-theory>

ライセンス

この作品はCC BY-NC 4.0の下でライセンスされています。商用利用には夏恒治博士の明示的な許可が必要です。