

プレートテクトニクス50年のいま

吉田晶樹

■ プレートテクトニクス誕生年

プレートテクトニクス理論誕生の立役者の1人であるイギリスのダン・マッケンジー(D. McKenzie)博士は、日本学士院客員に選定された記念として、2018年1月に東京・上野の日本学士院で講演を行った。「創始者が語るプレートテクトニクス50年」(Plate tectonics at 50)という演題であった。博士の生の声で固体地球科学の50年間の発展史を再確認できたことは、地球物理学界の末席を汚す筆者にとっても非常に大きな刺激であった。

プレートテクトニクス理論では、プレートを球面上におかれた剛体の岩盤と近似し、その運動を1つの極を中心とした回転運動とみなす。そして、地震や造山運動などのさまざまな地質現象の原動力を、相対運動するプレートどうしの境界部分の変動に求める。「約」50年前に誕生したこの理論は、いうまでもなく現在では固体地球科学研究の基盤となっており、世界最古の地質学会であるロンドン地質学会は、「プレートテクトニクス50年」を大々的に祝い、特集ウェブページも公開している¹⁾。

ここで「約」50年前と書いたのは、プレートテクトニクス理論が誕生した年を何の出来事をもって「誕生年」とするか議論の余地があるからだ²⁾。プレートテクトニ

クスの考えは、1960年代初頭にディーツ(R. S. Dietz)とヘス(H. H. Hess)によって提唱された海洋底拡大説を、ヴァイン(F. Vine)とマシューズ(D. Matthews)が海底の岩石の地磁気異常解析によって証明したことから始まる³⁾。そして、ウィルソン(J. T. Wilson)によるトランスフォーム断層の概念の出現⁴⁾などを経て、マッケンジー、パーカー(R. L. Parker)、モーガン(J. Morgan)、ル・ピション(X. Le Pichon)が、1967~68年にプレートの運動学に関する論文を相次いで発表したことで確立された⁵⁾。したがって、もし、プレートテクトニクスの基本原理が論文出版というかたちで「完成」された年を誕生年とするならば、1968年を「プレートテクトニクス誕生年」としてよいだろう。

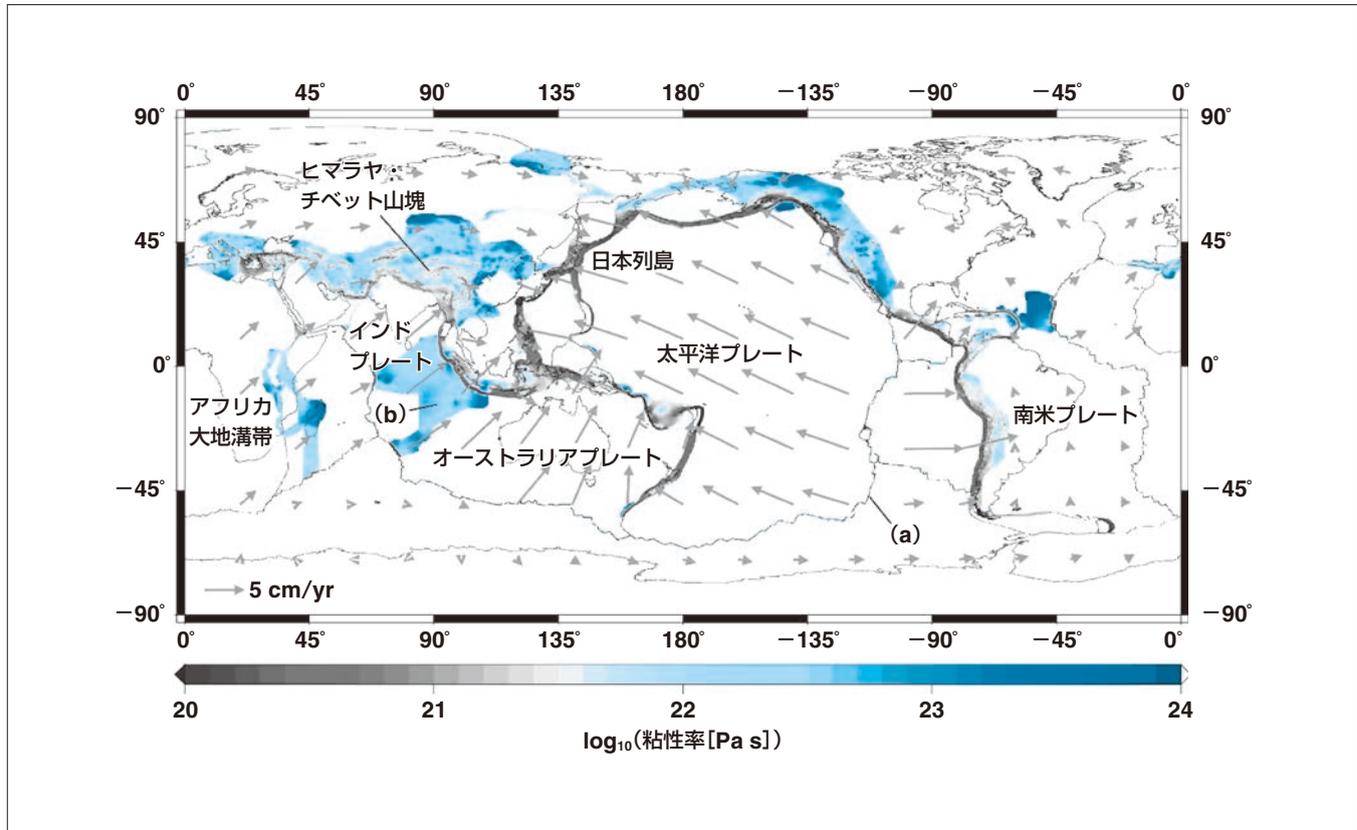
■ プレート運動で変形するプレートの固さ

実際の地球のプレートは剛体ではなく、力が加わったときに曲げやたわみが生じる。教科書ではプレートを弾性体や粘弾性体と扱うことで、それらの運動を定量化し、1次元的な観測データとの比較を可能にしている。しかし、巨視的な視点で、プレートの変形や運動を定量的に評価したり数理モデル化したりする場合には、プレートを「ある上限の粘性をもつ高粘性流体」として扱うほうが有効な場

合もある⁶⁾。

〈図1〉は人工衛星観測で得られた最新の「全球ひずみ速度モデル」⁷⁾に基づいて、筆者が解析した0.1度間隔での地球表面のリソスフェアの「固さ」分布である。ほとんど変形していない領域の固さを粘性率で表現すれば $10^{24} \sim 10^{25}$ パスカル・秒(Pa s)以上、 10^{27} Pa s以下となり、これは上部マントルの平均的な粘性率(10^{21} Pa s)と比較して少なくとも3~4桁は大きい。一方、たとえば太平洋プレートに注目すると、日本列島周辺や南米大陸西岸など、大陸プレートとのプレート境界域では $10^{20} \sim 10^{22}$ Pa s程度と粘性率がずいぶん小さくなっていることに気づく。したがって、大陸プレートのへりにある日本列島は、全地球的な視点で見ればほとんど変形のない状態のプレートよりも変形していることになる。また、インドプレートの北上のために形成されているヒマラヤ・チベット山塊を含む中央アジアの広範な領域や、アフリカ大陸の大地溝帯付近でも $10^{21} \sim 10^{23}$ Pa s程度と小さくなっている。

これらの「軟らかい」領域は、地球上のプレートの相互運動によってプレートが広範囲に変形し、ひずみエネルギーが蓄積されたり解消されたりする「緩衝帯」といえる。われわれの生命や財産を脅かす大地震や火山噴火の災害の多くはこの領域で発生する。また、大陸プレート内には、過去の大陸プレートの離合集散による造山活動の痕跡とされる「縫合帯(スーチャー・ゾーン)」とよばれる領域が存在し、これも、地球史の長い時間スケールでみると、太古から存在する安定大陸(クラトン)がマントル対流によってかくはんされるのを防ぐ緩衝帯としての役割を果たしていると考えられている⁸⁾。



〈図1〉観測データに基づいた地球表面のリソスフェアの粘性率分布

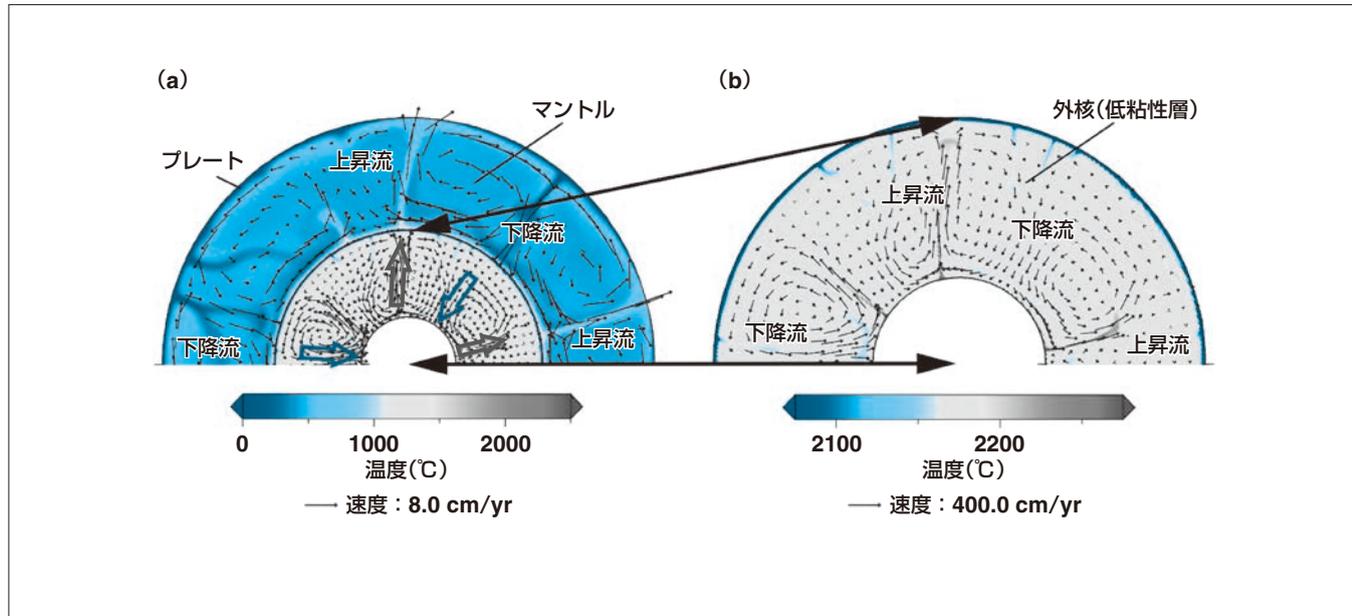
白い領域はプレートの変形がほとんどなく粘性率が大きい領域 ($\geq 10^{24}$ Pa s), 色が付いた領域は大きく変形して粘性率が小さくなっている領域 (カラースケールを参照), 灰色の矢印はプレート運動の方向と速度を表す。プレートが生成される海嶺付近では変形域 (a) の幅は非常に狭いが (粘性率は $10^{18} \sim 10^{20}$ Pa s), 海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込む海溝付近では変形域の幅が広い。大陸衝突が起こっているヒマラヤ・チベット山塊付近など, また, アフリカ大地溝帯やインドプレートとオーストラリアプレートの境界付近 (b) でも広範な変形域がみられる。

■ プレートテクトニクスと マントル・コアダイナミクス

岩石からなるマントルが地表の大气や海水で冷却されて粘性が高くなった層がリソスフェアであり, それが破壊現象によって分割された断片の1つ1つがプレートである。したがって, プレートやマントルを構成する岩石の物性値やレオロジー (変形・流動・破壊則) が物質科学的研究から与えられさえすれば, マントルを高粘性流体として扱い, その熱対流運動を計算機で数値シミュレーション (以下, 数値実験) することにより, プレ

ート運動を再現することが可能である⁹⁾。数値実験の手法を用いた最近のいくつかの地球物理学的研究から示唆されることは, プレート, とくに, 厚い「根」(テクトスフェア)をもつ大陸プレートが, その直下のマントルの流れに引きずられることによって「適度に」変形をしながら運動していることである^{10), 11)}。このことは, 剛体的なプレートがマントルの流れと分離して地表を漂っているという, 先駆的な数値実験結果¹²⁾に基づくプレート運動とマントル対流の関係に対する30年来の描像を更新するものと考える。現実的なプレート運動や大陸移動が計

算機のなかでようやく再現できるようになったいま, われわれがつぎに解明をめざしている研究の1つは, プレートテクトニクスが地球内部, とくに深部マントルやコア (外核・内核) の構造とダイナミクス (変動) に与える影響である。最近筆者は, マントルと比較して対流速度が桁違いに大きい外核の大規模な対流構造が, 年間10 cm程度の速度でゆっくりと動くマントル対流によって支配されていることを数値実験で明らかにした (図2)¹³⁾。地球表層から低温のプレートが沈み込み, やがてマントルと外核の境界まで到達すると, その直下の外核最上部



〈図2〉 マントル対流・外核対流の「一体化」数値シミュレーションの結果の一例

(a)はマンテルと外核(低粘性層)の対流パターンの様子、(b)は外核を拡大した図。色は温度(温位)場、小さい矢印は速度場を表す。(a)の太い中抜き矢印は外核のおおよその対流パターンを表す。このシミュレーションでは、マンテルと外核の境界に人為的な境界条件をいっさい設けることなく、マンテルと外核の熱対流運動を1つの熱対流システムとして扱っていることが特徴である。外核の下面で一定温度で加熱し、マンテルの上面(地表面)で一定温度で冷却している。マンテルと外核で上昇流と下降流の位置がおおよそ一致していることがわかる。

の熱が水平平均よりも多くマンテル側に奪われる。その結果、周囲よりも低温になった外核最上部から、さらに地球深部に向かう下降流が発達するという解釈である。

■「プレートテクトニクス100年」までに…

プレートテクトニクス50年のいまでも、固体地球科学のさまざまな研究分野が地球表層活動の物理的理解を追い求めている。今後、地球内部について、物理学的研究のみならず物質科学的研究¹⁴⁾からの理解もさらに深まれば、プレートテクトニクス理論はマンテル・コアダイナミクスにかかわる普遍的現象をも包含する大統一理論にまで発展するかもしれない。また、地球内部対流の数値実験については、そのモデル設計のさいに「品質管理」された地球表層の観測データ(〈図

1)はその一例)を適切に活用することで、海溝型巨大地震や内陸大地震¹⁵⁾の将来予測、また、火山噴火の規模と関係する地下の移流熱流量の時間推移予測など、防災・減災分野にもやがて寄与できるようになるだろう。これらの課題は「プレートテクトニクス100年」までに間に合うだろうか。

参考文献

- 1) ロンドン地質学会: <https://www.mckenziearchive.org/>.
- 2) Editorials: *Nature* **550**, 7(2017).
- 3) F. J. Vine and D. H. Matthews: *Nature* **199**, 947(1963).
- 4) J. T. Wilson: *Nature* **207**, 343(1965).
- 5) D. McKenzie and R. L. Parker: *Nature* **216**, 1276(1967); X. Le Pichon: *J. Geophys. Res.* **73**, 3661(1968); W. J. Morgan: *J. Geophys. Res.* **73**, 1959(1968).

- 6) M. Takaku and Y. Fukao: *Phys. Earth Planet. Int.* **166**, 44(2008).
- 7) C. Kreemer *et al.*: *Geochem. Geophys. Geosyst.* **15**, 3849(2014).
- 8) M. Yoshida: *Tectonophysics.* **532-535**, 156(2012).
- 9) たとえば, R. Trompert and U. Hansen: *Nature* **395**, 686(1998).
- 10) M. K. Kaban *et al.*: *Nature Geosci.* **8**, 797(2015).
- 11) M. Yoshida and Y. Hamano: *Sci. Rep.* **5**, 8407(2015); M. Yoshida and M. Santosh: *Geosci. Front.* **9**, 1279(2018).
- 12) M. Gurnis: *Nature* **332**, 695(1988).
- 13) M. Yoshida *et al.*: *Phys. Fluids* **29**, 096602(2017); M. Yoshida: *Phys. Fluids*, **30**, 096601(2018).
- 14) 土屋卓久: *パリティ* 2018年1月号67ページ.
- 15) 松澤 暢: *パリティ* 2017年1月号72ページ.