

超大陸アメイジアと全地球ダイナミクス研究

吉田 晶樹

国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球深部ダイナミクス研究分野・主任研究員

1. 本講演の概説

本フォーラムのテーマが「日本・地球・未来」ということであり、私の専門分野である「固体地球科学」、「地球内部物理学」の視点から、これらのキーワードに関連する話題を提供したい。

固体地球科学の大きなテーマの一つは、現在の地球内部の状態(温度・粘性構造, 組成分布)や、地球 46 億年史における地球内部活動と地球表層運動との相互作用の歴史を包括的に理解することである。本講演で紹介する数値シミュレーションは、固体地球科学において、観測・調査, 実験, 理論に並ぶ有効な研究手法の一つであり、また、地球科学的な観測・調査データを活用した数値シミュレーションで得られた成果は、それらのデータを補完する役割があるだけではなく、隣接研究分野に新たな研究指針や方向性を与え続けることができる。

最近 10 数年間のスパコンの計算速度の向上と数値計算技術の発展によって、現実的な地球マントルの物性パラメータを考慮したマントル対流の三次元数値シミュレーションが可能になりつつある。現在では、気象学における数値予測でもそうであるように、「全球モデル」(つまり、全地球規模の地学現象を研究対象としたモデル)と、「領域モデル」(つまり、特定の研究対象地域下、例えば、日本列島を含むユーラシア大陸東縁地域下で起こる小規模スケールの地学現象を研究対象としたモデル)を、研究者が研究課題に応じて自在に使い分けている。

私は 1990 年代後半から、マントル対流の数値シミュレーション研究に取り組み、計算手法の改良を重ねながら、固体地球物理学上の第一級のテーマである、地球表層運動と地球内部活動との熱的・化学的・力学的相互作用、プレート運動や大陸の離合集散の原動力、地球表層からマントル深部に沈み込む海洋プレート・海洋地殻層の挙動等の解明を目指している。

本講演では、私がここ数年行ってきた、「全球モデル」に基づいて地球を「丸ごと」扱う研究、特に、二億年前の「超大陸パンゲア」時代から現在、そして未来の「超大陸アメイジア」に至るまでの大陸移動の歴史を再現・予測する研究(図 1)、また、時間スケールが大きく異なるために、これまで独立して扱われてきたマントルと地球中心核(コア)の熱対流運動を、一つの熱対流システムで同時にシミュレートする研究等を中心に紹介する。さらに、地質学や地震学、地球化学の研究者と共同でこれから実施しようとしている最先端の研究についても触れたい。

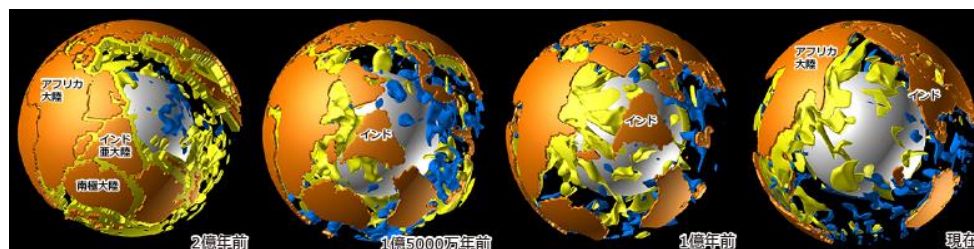


図 1. 二億年から現在までの大陸移動を再現する三次元全球マントル対流の数値シミュレーション結果 (Yoshida & Hamano, 2015, Scientific Reports)。左から右へ時間が進む。青色と黄色の等値面は、それぞれ、マントル内部の低温異常域と高温異常域、茶色の領域は大陸の位置、中心の白い球は地球中心核(コア)の位置を表す。

2. 補足資料「プレートテクトニクス 50 年のいま」

—『パリティ』(丸善出版)2019 年 1 月号,「特集:物理学, この1年」の論文草稿より—

2-1. 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一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置かれた剛体の岩盤と近似し、その運動を一つの極を中心とした回転運動と見なす。そして、地震や造山運動等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同士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、言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 (<https://www.mckenziearchive.org/>)。

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。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) とマッシュューズ (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。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。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形で「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」としてよいのだろう。

2-2. 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撓みが生じる。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、一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「ある上限の粘性を持つ高粘性流体」として扱う方が有効な場合もある。

図 2 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」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、例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 程度と粘性率が随分小さくなっていることに気付く。したがって、大陸プレートの縁にある日本列島は、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 $10^{21} \sim 10^{23} \text{ Pa s}$ 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」と言える。我々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)」と呼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見ると、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攪拌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。

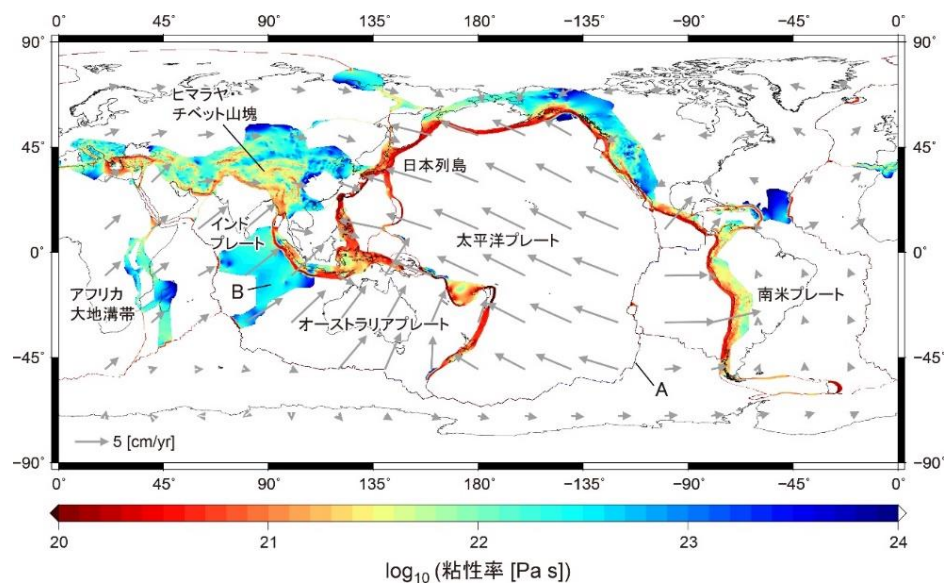


図 2. 観測データに基づいた地球表面のリソスフェアの粘性率分布 (Yoshida, 2010, Earth Planet. Sci. Lett.). 白い領域はプレートの変形がほとんどなく粘性率が高い領域 ($\geq 10^{24} \text{ Pa s}$), 色が付いた領域は大きく変形して粘性率が小さくなっている領域 (カラスケールを参照), 灰色の矢印はプレート運動の方向と速度を表す。プレートが生成される海嶺付近では変形域 (A) の幅は非常に狭いが (粘性率は $10^{18} \sim 10^{20} \text{ Pa s}$), 海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込む海溝付近では変形域の幅が広い。大陸衝突が起きているヒマラヤ・チベット山塊付近等, 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見られる。

2-3. 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気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一つ一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。数値実験の手法を用いた最近の幾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、特に、厚い「根」(テクトスフェア)を持つ大陸プレートが、その直下のマントルの流れに引き摺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。このことは、剛体

的なプレートがマンテ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に基づくプレート運動とマンテル対流の関係に対する 30 年来の描像を更新するものとする。

現実的なプレート運動や大陸移動が計算機の中でようやく再現できるようになった今、我々が次に解明を目指している研究の一つは、プレートテクトニクスが地球内部、特に深部マンテルやコア(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、マンテ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テ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 3)。地球表層から低温のプレートが沈み込み、やがてマンテルと外核の境界まで到達すると、その直下の外核最上部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。

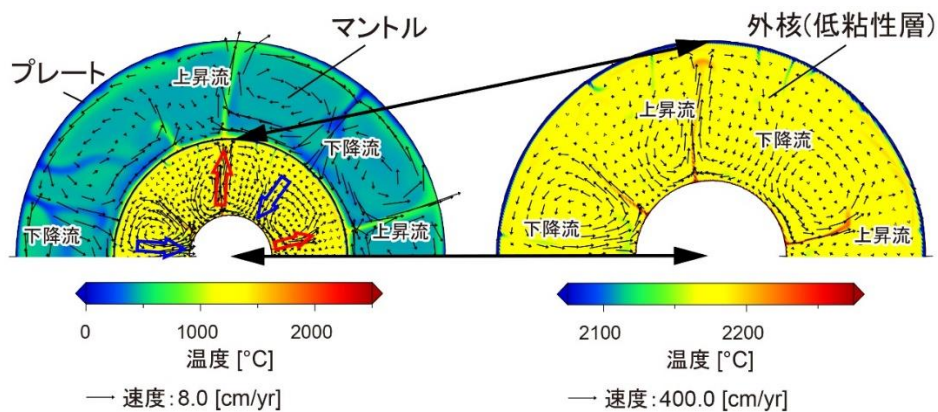


図 3. マンテル対流・外核対流の「一体化」数値シミュレーションの結果の一例 (Yoshida et al., 2017, Phys. Fluids)。左図はマンテルと外核(低粘性層)の対流パターンの様子、右図は外核を拡大した図。色は温度(温度)場、小さい矢印は速度場を表す。左図の太い中抜き矢印は外核のおおよその対流パターンを表す。このシミュレーションでは、マンテルと外核の境界に人為的な境界条件を一切設けることなく、マンテルと外核の熱対流運動を一つの熱対流システムとして扱っていることが特徴である。外核の下面で一定温度で加熱し、マンテルの上面(地球表面)で一定温度で冷却している。マンテルと外核で上昇流と下降流の位置がおおよそ一致していることが分かる。

2-4. 「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 年の今も、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係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、そのモデル設計の際に「品質管理」された地球表層の観測データ(図2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。

3. 本講演内容に関連する文献等

- 吉田 晶樹, プレート運動と大陸移動の原動力—再考, 『地質学雑誌』, 121(12), 429-445, 2015. <https://doi.org/10.5575/geosoc.2015.0031>
- 吉田 晶樹, 大陸とプレートを動かす力とは何か—大陸移動説“完成”から 100 年目で分かっていること, 『科学』, 特集: 大陸移動説からプレートテクトニクスへ—『大陸と海洋の起源』 100 年, 85(7), 692-704, 2015.
http://yoshida-geophys.jp/papers/Yoshida_2015_Kagaku_with_TOC_Cover.pdf
- 吉田 晶樹, ウェゲナー『大陸移動説』完成 100 年に寄せて, 『JAMSTEC ニュース:コラム』, 2015 年 9 月 14 日. http://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20150914/
- 吉田 晶樹, プレートテクトニクス 50 年のいま, 特集: 物理科学, この 1 年, パリティ, 34(1), 2019. (2018 年 12 月 25 日発売。本レジメ 2 章に論文草稿)
- 吉田 晶樹, 『地球はどうしてできたのか—マントル対流と超大陸の謎—』, ブルーバックスシリーズ, 講談社, 268 ページ, 2014 年 9 月.
- ニュートン編集部編, 『Newton 別冊 地球と生命 46 億年のパノラマ』, ニュートンプレス, 170 ページ, 2015 年 12 月.
- 『Newton』 2015 年 5 月号, FOCUS「スパコンで大陸移動の再現に成功」, 12—13 ページ, ニュートンプレス, 2015 年 3 月.
- 『日経サイエンス』 2016 年 11 月号, NEWS SCAN 国内ウオッチ「2 億 5000 万年後の超大陸」, 18—19 ページ, 日経サイエンス, 2016 年 9 月. <http://www.nikkei-science.com/?p=51107>
- Masaki Yoshida and Yozo Hamano, Pangea breakup and northward drift of the Indian subcontinent reproduced by a numerical model of mantle convection, *Scientific Reports*, 5, 8407, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep08407>
- Masaki Yoshida, Formation of a future supercontinent through plate motion-driven flow coupled with mantle downwelling flow, *Geology*, 44(9), 755-758, 2016.
<https://doi.org/10.1130/G38025.1>
- Masaki Yoshida and Yozo Hamano, Numerical studies on the dynamics of two-layer Rayleigh-Bénard convection with an infinite Prandtl number and large viscosity contrasts, *Physics of Fluids*, 28(11), 116601, 2016. <https://doi.org/10.1063/1.4966685>
- Masaki Yoshida, Hikaru Iwamori, Yozo Hamano, and Daisuke Suetsugu, Heat transport and coupling modes in Rayleigh-Bénard convection occurring between two layers with largely different viscosities, *Physics of Fluids*, 29(9), 096602, 2017.
<https://doi.org/10.1063/1.4989592>
- 『Science News』, Evidence falls into place for once and future supercontinents, Vol. 191, No. 1, p.18–21, Society for Science & the Public, Washington, D.C., USA, January 21, 2017.
http://yoshida-geophys.jp/miscel/Science_News_supercontinent_feature_21_Jan_2017.pdf
- 『New Scientist』, The next supercontinent: Four ways Earth could reshape itself, by Stephen Battersby, Vol. 236, Issue 3147, p.34–37, Reed Business Information Ltd., London, UK, October 14, 2017.
http://yoshida-geophys.jp/miscel/171014_F_SuperContinent.pdf