

56. 内核成長に伴うコア最上部の流れの時空間変化に着目した地球磁場逆転の原因解明－全地球数値実験による試み

海洋研究開発機構海域地震火山部門火山・地球内部研究センター主任研究員

吉田 晶樹

概要

本研究の目的は、マントルから地球中心核（外核と内核）まで固体地球内部で起こる熱対流運動を一つの対流システムとして扱う数値シミュレーション実験によって、内核の成長が外核からマントルに運ばれる熱流量の時空間変化や、外核内の流れ・温度・対流パターンの時空間変化に及ぼす影響等を解析し、地球史を通じて地球表層環境や生命進化に影響を与えてきた地磁気逆転の原因の一端を探ることであった。本研究の結果、(1) 内核が時間に従って成長するモデルでは、内核・外核境界が外核にとって固定温度の下面境界の役割を果たすことによって、外核の対流パターンの水平スケールやコア・マントル境界（CMB）直下の水平温度不均質のスケールが、内核を考慮しない場合と比較して大規模になること、(2) 上部・下部マントル境界での対流運動の妨げが大きいと推定される過去（太古代）のマントル対流パターンでは、現在の地球のようなほぼ全マントル対流に近いパターンと比較して、CMB 直下の水平温度不均質のスケールがより大規模になることなどが分かった。そして、本研究のシミュレーション結果とこれまでの地球ダイナモの数値シミュレーション結果に基づき、地球史における双極子磁場強度の時間変化を議論した。

本助成により、本研究を効率的に遂行するための計算機環境を整備することができ、論文発表という目的を達成しただけではなく、今後の研究課題や展望に関するアイデアも次々と生まれたことに感謝したい。

背景および目的

地球の磁場はN極とS極からなる双極子磁場が卓越し、過去500万年間で平均して約20～30万年に一回の割合で逆転してきた。しかし、その逆転間隔は一定ではなく、例えば最近の地磁気逆転からは約77万年が経過している。このような地磁気逆転の主要原因は、自転の影響を受ける外核内の乱流運動の不安定性の増大によるものであることが電磁流体力学に基づく数値シミュレーションから明らかになったが（Glatzmaier et al., 1999）、一方で、コア・マントル境界（CMB）直下の対流運動の振る舞いに原因を求める考えもある。例えば、別のシミュレーションによって、CMB直下の外核最上部における温度不均質の水平スケールが地球磁場の強度に影響を与えることが報告されており（Sakuraba and Robert, 2009）、地磁気逆転の原因は未だ明らかでない。

これらの地球ダイナモを実現するシミュレーションは、現在の外核の厚さで固定された三次元球殻モデルで行われてきた。しかし、現在、地球最深部に存在する内核は、その誕生時期は現在でも議論があるものの（Dobson, 2016）、流体鉄からなる外核が固化しながら、次第に現在の大きさ（半径1221.5 km）まで成長してきたと考えられている。内核の成長は流体層としての外核の厚さのみならず、上下面境界の熱的・力学的境界条件を時間変化させるはずであり、外核で起こる対流の振る舞いにも影響を与えてきた可能性がある。

そこで本研究では、我々が開発した、地球のマントルと外核の二層の対流運動を一つの熱対流システムで解くための数値モデル（Yoshida and Hamano, 2016; Yoshida et al., 2017）を発展させ、内核の成長を考慮した数値シミュレーション実験を行った。そして、外核からマントルに運ばれる熱流量の時空間変化や、外核内の流れ・温度・対流パターンの時空間変化に及ぼす影響等を解析し、地磁気逆転の原因の一端を探ることが目的であった。

方法

本研究では、まず、従来のマントルと外核に加え、内核を考慮した三層の熱対流システムの数値シミュレーション実験を行った（Yoshida, 2018）（ここでは、「モデル 2018」とする）。計算モデルは、計算解像度に重点を置くため、地球の赤道面を想定した二次元の円筒モデルとし、球の外側にマントルに相当する厚さ 2891 km の高粘性層、内側に厚さ 3480 km の外核に相当する低粘性層を設定した（図 1a）。計算機能力の制限により、外核の粘性率はマントルの粘性率より 3 桁小さいとした。そして、外核よりも高粘性の内核の半径が時間とともに成長するものとし、1 億年かけて現在のサイズ（半径 1221.5 km）まで成長すると仮定した。対流運動を駆動する熱源として、地球が形成時から保持している始原的エネルギーを考慮してシステム全体を一様に加熱し、地球表面において一定温度で冷却されると仮定した。地球表面の力学的境界条件は自由滑り・不透過境界とした。マントルと外核、外核と内核の各層間の境界には人為的な境界条件は設けず、実効熱膨張係数を局所的に負にすることで、熱的にも力学的にも連続した熱対流システムを実現した。

次に、別のモデルとして、最近の物質科学的研究から示唆される地球内部の進化モデル（Murakami et al., 2012）に基づき、マントルの対流パターンを、現在の地球に相当する「（ほぼ）全マントル対流型」と、過去（おそらく、太古代）の地球に相当する「ハイブリッドマントル対流型」に分けてシミュレーションを行った（Yoshida, 2019）（ここでは、「モデル 2019」とする）。「ハイブリッドマントル対流型」とは、マントルが完全な二層対流ではないが、深さ 660 km の上部・下部マントル境界（図 1b）で対流が一時的に妨げられる対流パターンであり、境界面での「相浮力パラメータ」（クラウジウス・クラペイロン勾配と上下の流体の密度差の積で表される）が負で、かつ、その絶対値が適度に大きい場合に実現される。計算モデルは、モデル 2018 とほぼ同様であるが、内核の成長は考慮せず、他の地球物理学的研究による推定に基づき、上部マントルの粘性率が下部マントルの粘性率より 30 倍小さい場合と 100 倍小さい場合でシミュレーションを行った。

いずれのモデルも、温度場の初期条件は先行モデル（Yoshida et al., 2017）の温度場データを使用し、温度場と速度場が統計的平衡状態に到達した後、「モデル 2018」は 1 億年以上、「モデル 2019」は 10 億年間以上計算し、結果を解析した。

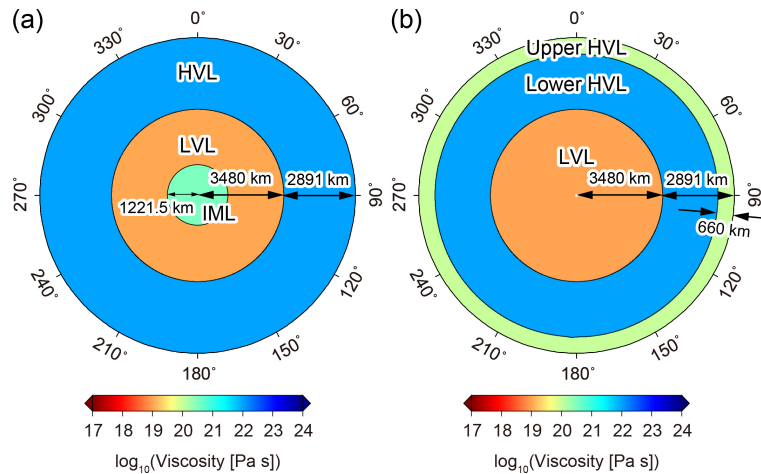


図 1. 本研究で扱う数値シミュレーションモデル。

地球の半径（6371 km）をもつ二次元円筒モデルで、厚さ 2891 km のマントル（HVL）とその内側の半径 3480 km の外核（LVL）の対流運動を一つの熱対流システムとして扱う。カラーは粘性率の大きさを対数で表し、マントルの基準粘性率は 10^{22} Pa s とした。本モデルの外核の粘性率は実際の外核の粘性率よりも非常に大きいため、自転の影響は無視した。「モデル 2018」(a) では、上部マントルと下部マントルの粘性率は同じとし、外核の中心から時間に従って成長する内核（IML；最終的な半径は 1221.5 km）を考慮した。一方、「モデル 2019」(b) では、深さ 660 km より浅い上部マントルの粘性率が下部マントルの粘性率に比べて 30 倍小さい場合と 100 倍小さい場合について調べた（b は 100 倍小さい場合）。

結果および考察

まず、モデル 2018 を用いた数値シミュレーション実験の結果、内核が時間に従って成長する場合（図 2b）には、内核の成長を考慮しない場合（図 2a）と比較して、外核の平均温度が小さくなることが分かった。これは、高温の内核が存在する場合、内核・外核境界（ICB）が外核にとって固定温度をもつ下面境界の役割を果たすことによって、外核の対流が活発になり、冷却効率が良くなるためである。また、互いに対蹠地にある二箇所の領域（図 2b で P と Q と示した領域）の ICB から断続的に発生する高温の上昇プルームの影響を受けて、外核の対流パターンの水平スケールがより大規模になり、それによって、CMB 直下の水平温度不均質のスケールもより大規模になることが明らかになった。これまでの地球ダイナモのシミュレーションによって、CMB の温度境界条件を熱流量固定とした場合には、温度固定の場合よりも CMB 直下の温度と流れの構造が大規模になり、双極子磁場強度が強くなることが報告されている (Sakuraba and Roberts, 2009)。本研究のシミュレーション結果から、内核が成長することによって CMB 直下の水平温度不均質のスケールがより大規模になることは、現在の地球の双極子磁場強度が維持される一つの重要な条件ではないかと考える。

また、現在のサイズに近くなるまで十分に成長した内核の温度は外核よりも高温ではほぼ一定であるが、ICB の二箇所の対蹠領域から上昇プルームが時間的に交互に発生するため、それに対応して ICB の熱流量も時間変化し、内核の温度場や圧力場のパターンが軸対称で入れ替わる興味深い現象も見られた。

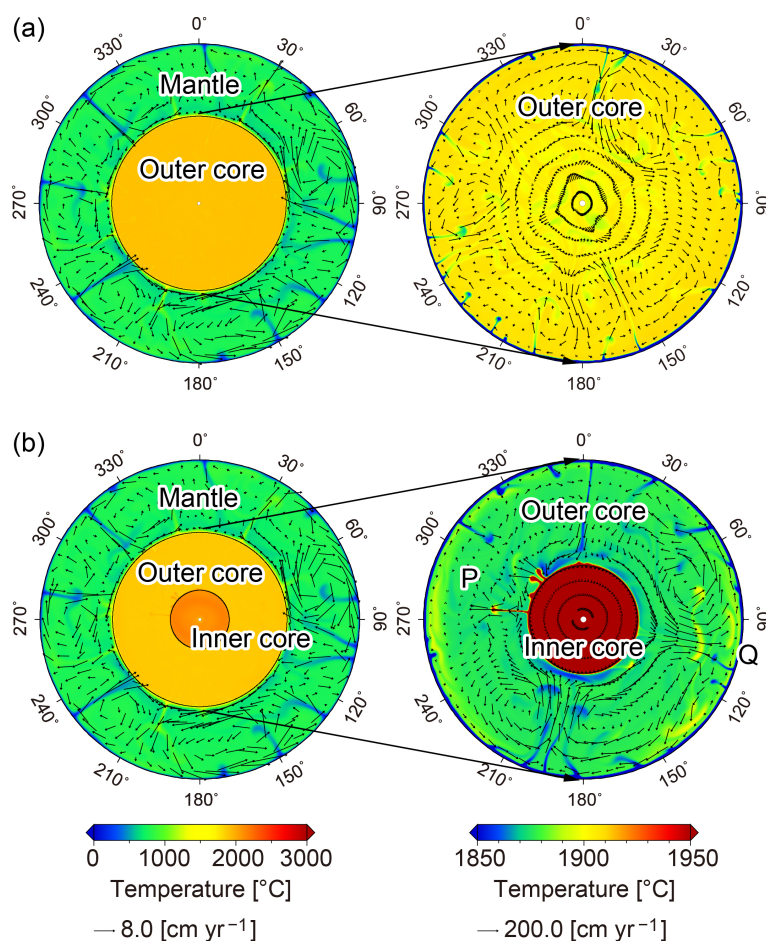


図 2. 「モデル 2018」の数値シミュレーション結果.

内核の成長を (a) 考慮しなかった場合と (b) 考慮した場合。カラーは温度場、矢印は速度場を示す。内核の成長を考慮した場合 (b)、考慮しない場合と比較して外核の平均温度が小さく、領域 P では内核・外核境界から幾つかの上昇プルームがまさに発生している状態で、一方、領域 Q ではプルームの発生が一旦収まり、プルームヘッドのみが残されている状態であることが分かる。

一方、モデル 2019 を用いた数値シミュレーション実験の結果、バイブリッドマンントル対流型の対流パターン（図 3b）では、全マンントル対流型の対流パターン（図 3a）の場合と比較して、CMB 直下の水平温度不均質のスケールがより大規模になり、また、CMB にかかる剪断応力や鉛直応力の解析から、力学的な水平不均質のスケールも大規模になることが分かった。これは、深さ 660 km の上部・下部マンントル境界での対流運動の妨げが大きいバイブリッドマンントル対流型の対流パターンでは、地表面から下降する低温のブルームが深さ 660 km 上に長時間蓄積して水平方向に拡がり、その結果、下部マンントルでは上部マンントルからのまとまった下降流域が形成されやすくなり、その対蹠領域では上昇ブルームが発生しやすくなるためである。例えば、図 3 で CMB 直下の温度が平均より高い場所 H のマンントル側ではマンントルの下降流域が存在し、逆に平均より低い領域 L ではマンントル上昇流が存在するが、全マンントル対流型（図 3a）では、マンントルの上昇流域と下降流域が二つペアで存在するのに対し、ハイブリッドマンントル対流型（図 3b）では、それらが一つずつであることが分かる。これらの結果は、上部・下部マンントルの粘性率比には依存しなかった。

最近の地球ダイナモの系統的シミュレーションでは、CMB の速度境界条件として滑りなし境界よりも自由滑り境界としたほうが双極子磁場強度が強くなる傾向があることを示している（Dharmaraj et al., 2014）。本研究のバイブリッドマンントル対流型の対流パターンで、CMB 直下の温度や応力の水平不均質が大規模になるということは、そこでの流れの自由度が大きくなる（CMB の全経度 にわたって、剪断応力がゼロになる地点が少ない）ということであり、CMB が自由滑り境界に近い役割を果たしていることを意味する。

なお、モデル 2019 では、モデル 2018 のように内核の成長を考慮したシミュレーションも行ったが、前述のモデル 2018 の結果と議論は変わりなかった。これは、外核の対流パターンの違いがマンントル対流には大きな影響は与えず、我々の先行研究（Yoshida and Hamano, 2016; Yoshida et al., 2017）で示したように、非常に高粘性でゆっくりとしたマンントルの対流運動のパターンが外核の対流運動を支配しているからである。

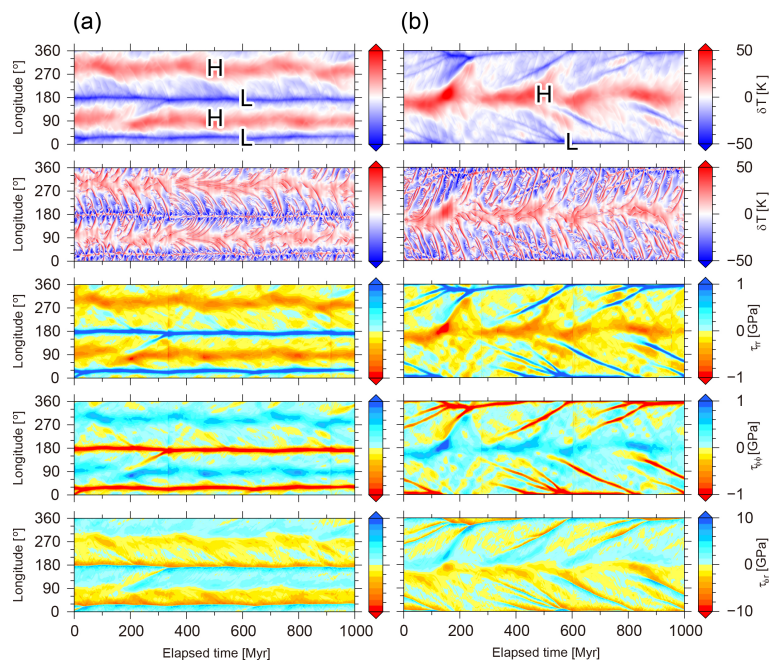


図 3. 「モデル 2019」の数値シミュレーション結果。

(a) 「全マンントル対流型」のパターンと (b) 「ハイブリッドマンントル対流型」のパターンによる結果。それぞれの図で上段から五段目まで、経過時間（横軸）に対する、コア・マンントル境界（CMB）下の約 10 km の温度異常（同じ深さでの平均温度からのずれ）、CMB 下の約 40 km の温度異常、CMB での半径方向の鉛直応力、CMB での経度方向の鉛直応力、CMB での剪断応力それぞれの経度方向（縦軸）の変化を示す。(a) で H と L はそれぞれ正と負の温度異常領域を示す。ハイブリッドマンントル対流型のパターンでは、全マンントル対流型のパターンと比較して、温度場と応力場の水平スケールが大きいことが分かる。

今後の展望および課題

本研究の結果から、地球の双極子磁場強度は、外核の流れと温度の水平スケールが大きく、外核最上部の流れの自由度が大きい過去（太古代）の地球のほうが強いのではないかと考えた。このことは、岩石試料の測定に基づく古地磁気学の結果（Macouin et al., 2004）と相反するが、この違いが、過去の遡るほど岩石試料のデータが少なくなり、測定結果も不確かになることによるものか、本研究の数値モデルに決定的に不足している要素があるのかは不明である。今後は、将来の大型計算機の性能向上と歩調を合わせ、モデルを三次元化し、より現実の地球に近づけた物性パラメータを考慮し、また、ダイナモ作用や自転による外力の効果が本研究の結論や議論に及ぼす影響について検討する必要がある。その上で、本研究で得られた知見は、観測されるマンタルの対流構造の時間変化から将来の地磁気逆転の予兆をつかむための手がかりとなるかもしれない。さらにその先の展望として、リソスフェアの生成・成長・消滅過程を考慮してプレート運動や大陸の離合集散（例えば、Yoshida and Santosh, 2018）を本モデルに考慮し、さまざまな地質現象が起こる地球の表層運動と、その根源となる地球内部の対流運動との熱的・力学的・物質学的相互作用、そして、そのような固体地球ダイナミクスと大気・海洋循環の相互作用に係わる諸問題を解明するための「地球丸ごと数値シミュレーション」（吉田, 2019）に繋げたい。

(完)

発表論文

- 1) Yoshida, M. Dynamics of three-layer convection in a two-dimensional spherical domain with a growing innermost layer: Implications for whole solid-earth dynamics. *Phys. Fluids*, **30**(9), 096601, 2018. [*Physics of Fluids* 誌の「Editor's Pick」に選出]
- 2) Yoshida, M. Influence of convection regimes of two-layer thermal convection with large viscosity contrast on the thermal and mechanical states at the interface of the two layers: Implications for dynamics in the present-day and past Earth. *Phys. Fluids*, **31**(10), 106603, 2019.
- 3) 吉田 晶樹. プレートテクトニクス 50 年のいま. 『パリティ』, **34**(1), 59–61, 2019.

引用文献

- 1) Dharmaraj, G., Stanley, S., Qu, A.C. Scaling laws, force balances and dynamo generation mechanisms in numerical dynamo models: Influence of boundary conditions. *Geophys. J. Int.*, **199**(1), 514–532, 2014.
- 2) Dobson, D. Earth's core problem. *Nature*, **534**, 45, 2016.
- 3) Glatzmaier, G., Coe, R., Hongre, L. et al. The role of the Earth's mantle in controlling the frequency of geomagnetic reversals. *Nature*, **401**, 885–890, 1999.
- 4) Macouin, M., Valet, J.-P., Besse, J. Long-term evolution of the geomagnetic dipole moment, *Phys. Earth Planet. Int.*, **147**(2–3), 239–246, 2004.
- 5) Murakami, M., Ohishi, Y., Hirao, N. et al. A perovskitic lower mantle inferred from high-pressure, high-temperature sound velocity data. *Nature*, **485**, 90–94, 2012.
- 6) Sakuraba, A., Roberts, P. Generation of a strong magnetic field using uniform heat flux at the surface of the core. *Nature Geosci.*, **2**, 802–805, 2009.
- 7) Yoshida, M., Hamano, Y. Numerical studies on the dynamics of two-layer Rayleigh-Bénard convection with an infinite Prandtl number and large viscosity contrasts. *Phys. Fluids*, **28** (11), 116601, 2016.
- 8) Yoshida, M., Iwamori, H., Hamano, Y., Suetsugu, D. Heat transport and coupling modes in Rayleigh-Bénard convection occurring between two layers with largely different viscosities. *Phys. Fluids*, **29**(9), 096602, 2017.
- 9) Yoshida, M., Santosh, M. Voyage of the Indian subcontinent since Pangea breakup and driving force of supercontinent cycles: Insights on dynamics from numerical modeling. *Geosci. Front.*, **9**(5), 1279–1292, 2018.