

実地球環境でのコア活動の数値シミュレーション

浜野洋三（海洋研究開発機構 地球深部ダイナミクス研究分野）

1. はじめに

地球の磁場は、溶融鉄を主成分とする外核（outer core）での対流によるダイナモ作用で生成・維持されている。過去の地球磁場の様子は地質学的な記録から復元することが可能である。それらが示すように、地球磁場は決して安定なものではなかった。特に大きな変動として、地磁気のN極とS極が過去に何度も逆転を繰り返したことが知られている。加えてこれら磁極の逆転の際には、地表の磁場強度は著しく弱まったことも明らかになっている。地磁気逆転は数十万年という時間スケールを持つ変動である。一方、堆積物にはより短い時間スケールの変動も記録されていて、気候変動と磁場変動との関連性も指摘されている。更に、数千万-数億年というより長い時間スケールで見ると、逆転頻度の変化や逆転の起こらない地磁気静穏期が存在したことが知られている。また、地球の誕生からどのくらい経過した時点で磁場をまとうようになり、地磁気が長期的にどのように進化してきたか、という点も興味深い。

我々は、こうしたさまざまなスケールで起こる地磁気変動のメカニズムの解明を主題として、実際の試料からの古地磁気の復元研究や、液体金属対流の実験などと連携しつつ取り組んできた。地磁気は高エネルギーの宇宙線に対するバリアともなっているため、地磁気変動の研究は、生命の生存可能な環境がどのように進化し維持されてきたのか、という観点からも重要である。

2. 研究の目的

近年の地球ダイナモ研究は、地磁気逆転の再現、外核内の対流の大規模パターンの復元等、大きな進歩を遂げてきている。しかし、計算機の限界からこれまでの研究では粘性パラメータを著しく高く設定している。それに伴う比較的高エクマン数・低レイリー数において知られているダイナモ作用の性質が、低粘性のより現実的な領域においても成り立つ

か検証しつつ新しい挙動を明らかにするという方向で、我々は高解像度の計算に進み、現実の磁場変動の理解をめざす。様々な時間スケールでの地磁気変動の中でも特に、地磁気の逆転は重要な問題であり、本課題ではそれを引き起こしたと考えられる外核の流れ場の変動について数値シミュレーションから明らかにする。

一方で、溶融鉄の物性は低粘性であることに加えて、高熱拡散、高磁場拡散、低物質拡散等、拡散係数の比である各種のプラントル数が1ではない。上と同様に計算機の限界からこれらを1近辺の値として扱ってきたが、実験の結果から、低いプラントル数が流れの挙動の再現にとって重要であることが明らかとなっており、実験室での実現が可能な対流系を対象にして現実的な拡散係数の比を扱う方向にも研究を進める。

3. 系の設定

本課題では上述の目的に対応して電磁流体現象に関する2つの対流系を扱う。

1つ目は、液体金属を用いた対流実験に対応した扁平な正方形容器内での、現実の小さいプラントル数かつ良導電性の液体の対流を扱うものである[1, 2]。水平方向の一樣な外部磁場を印加する。この系では回転の効果は考慮していない。系のスケールが小さい（磁気レイノルズ数が小さい）ためにダイナモ作用はごく弱い。実現する対流の形態について室内実験との比較を注意深く行って、コードの信頼性を保証している。

2つ目は、外核を模した二重回転球殻間での導電性流体の対流系であり、地球のようなダイナモ作用を起こすことを主眼としている[3, 4]。計算資源の都合上こちらではプラントル数は1近辺としている。これまでに地球シミュレータ上で使用してきたコードに改良を重ねて、より広範囲の問題に対応し、また高解像度で高い性能を発揮できるようになった。

4. 結果1 液体金属シミュレーション

対流場は印加磁場に規定されて磁場方向に軸を持つロール状の構造をとる(図1)。ロールの数は磁場強度とともに若干多くなるが、系のアスペクト比との関係で容器にぴったりと適合しない場合には、ロール数の変化を繰り返す。この変化には水平面内での大きな循環の発生が重要であり、ロール構造を歪ませてロール間の再結合を引き起こす[2]。このような数値シミュレーションと室内実験を合わせて、これまで手薄だった低プラントル数の対流像を構築することができた。

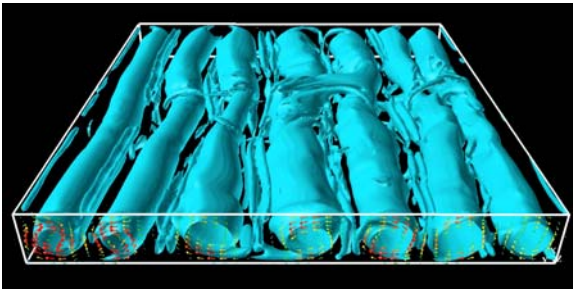


図1: アスペクト比8の正方形容器内での対流ロールの様子を、流れ場から求めるQ3Dという値の等値面で表示。手前から奥の方向への水平の一様磁場を印加して、その方向に対流ロールの軸が向いている。

5. 結果2 ダイナモシミュレーション

改良したコードを使い、従来の研究で知られているダイナモの挙動が再現できることを確かめた上で、流れ場の詳細な解析を行った。

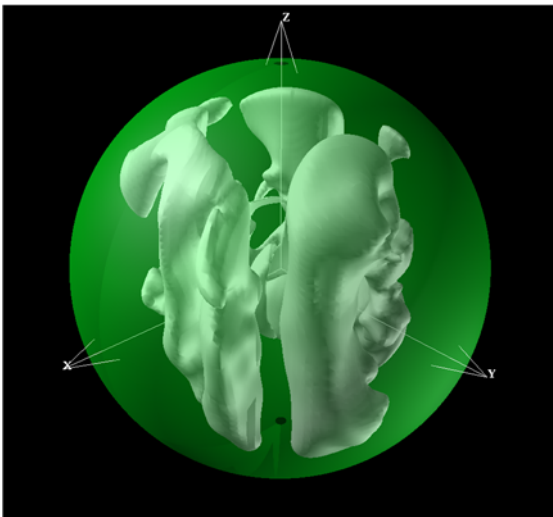


図2: ダイナモ作用を起こしている回転球殻内での対流について、Q3Dの等値面を表示。回転軸はz向きであり、その方向に伸びた対流ロールが存在している。

回転球殻内での対流場は、回転の影響を強く受けて、回転軸の方向に軸を持つロール構造をとる(図2)。このケースでは双極子型の磁場が生成されるとともに、その極性が不規則に逆転を繰り返しており、地球型のダイナモが再現されている。流れ場の詳細から以下のことが分かった。流れ場全体が剛体的に回転する成分があるが、逆転の前にはその回転速度が緩やかになる。それと同時にロール構造が変化し、ロールの数が減少する。再びロール数が増えて全体的な回転速度も増加し、逆転の完了時には元の状態を回復している。

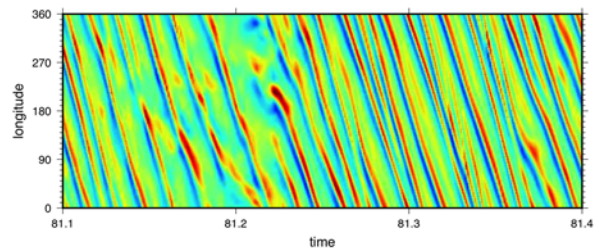


図4: 赤道面において、半径を固定し円周に沿った位置での、外向き流速の時間変化を表示したもの。ロール数の変化があることが分かる。

6. まとめ

一様な磁場と回転はどちらもその方向に対流ロールの軸を規定する働きを持つ。ここで扱った2つの系は、外部条件によって規定されたロール構造が間欠的にその数を変化させる、という共通の性質を持つ。流れ場の一連の変化と磁場反転との対応は今回初めて明確になったものであり、ダイナモのメカニズムを考察する上で重要な特徴である。

7. 文献

- [1] A. Sakuraba and P. H. Roberts, *Nature Geosci.* **2**, 802-805, 2009.
- [2] F. Takahashi, *Earth, Planets Space*, **66**, 157, 2014.
- [3] T. Yanagisawa, Y. Hamano, T. Miyagoshi, Y. Yamagishi, Y. Tasaka, and Y. Takeda, *Phys. Rev. E*, **88**, 063020, 2013.
- [4] T. Yanagisawa, Y. Hamano, and A. Sakuraba, *Phys. Rev. E*, **92**, 023018, 2015.