

A sheet-metal geodynamo

地球科学

シート状の対流が作る地球ダイナモ

Ulrich R. Christensen

地球のコアをコンピュータ上でモデル化しようとする取り組みが始まってから 10 年になる。研究者たちは、地球磁場が生成する仕組みはわかっていると思っていたが、より現実に近いシミュレーションが可能になった今、その自信をぐらつかせる結果が報告されている。

Nature Vol.454 (1058-1059) / 28 August 2008

地球磁場は、惑星の中に巨大な棒磁石が入っているような形で表現されることが多い。実際にこの磁場を作り出しているのは、ダイナモ（発電機）過程で発生する強い電流である。電流は、外核とよばれる地球のコアの外側部分で液体鉄が流れることにより生じてくる。この液体鉄は、地球の自転軸に平行に並んだ長い円柱の中を、らせんを描きながら流れているとされている。従来のコンピュータ・シミュレーションでは、計算を単純化するために多くの仮定がなされていたにもかかわらず、地球のコアのこうした流れと磁場の特性の両方を非常によく再現することができていた。Nature 2008 年 8 月 28 日号 1106 ページでは、陰山聡ら¹が、地球のコアをより忠実にモデル化できるシミュレーションについて報告している。このモデルでは、液体鉄の流れは円柱状ではなく薄いシート状になるとされ、地球ダイナモの仕組みに関する今日の理解に疑問を投げかけている。

自転車のライトに電力を供給するような単純なダイナモでは、磁場の中をワイヤが動くことによって、ワイヤ中に電流を発生させている。自動車や発電所で使われているような高性能ダイナモの磁場は、外部から加えられるのではなく、ダイナモ自体の電流によって作り出されている。こうしたダイナモで発電できるのは、コイル状に巻かれたワイヤが電流を誘導するからである。しかし、地球のコアは構造化されていない鉄の球であり、その外側の部分は流体である。これが単純に回転するだけでは、磁場を生じさせることはできないだろう。この液体金属は、高性能ダイナモのコイルに似た複雑な経路に従って運動しているはずである。

流体の外核における物質の流れは、対流によって

生じる。対流は主として、固体の内核から上昇してくる熱と軽い元素（ケイ素やイオウなど）の流れによって駆動されている。この対流は、地球の自転による力の影響を強く受ける。北半球の低気圧を反時計回りに、南半球の低気圧を時計回りに回転させるコリオリの力は、こうした力の一例である。対流が弱ければ、この流れは南北方向に並んだ円柱状となり、流体粒子はこの中を、らせん軌道を描きながら動いていく（図 1）。この状況下で双極子（棒磁石のような）構造をもつ磁場が発生することは、理論研究により示されている²。地球ダイナモについての過去のコンピュータ・シミュレーションでは、回転する球体中での流体の流れと磁場の誘導についての方程式を解き、こうした円柱の存在と、磁場の発生におけるその役割を裏づけることができた^{3,4}。シミュレーションでは、地球のコアの上部から出た磁力線が主として「ローブ」とよばれる形になり、北緯 60°と南緯 60°付近の同じ子午線上に対を成して現れることも示された。ローブの位置は、個々の対流の円柱がコアの外側の境界に触れるところであると考えられている⁵。

地球ダイナモのすべてのコンピュータ・モデルには、コアの実際の状態をシミュレーションすることができないという欠点がある。このようなシミュレーションには、今日のコンピュータよりもはるかに強力なコンピュータが必要になるからである。例えば、現在のコンピュータの解像度では流れの中の小規模な渦を表現することができないため、こうした渦を生じさせないようにするために、液体コアの粘性率を非現実的なほど大きくしなければならぬのである。この粘性率はエクマン数（粘性摩擦力のコリオリの力に対する

比)によって表すのが便利である。地球のコアのエクマン数は小さく、 10^{-15} 程度であるが、従来の地球ダイナモのシミュレーションではエクマン数を 10^{-6} までしか下げられず、ほとんどの場合は、より大きな値が使われていた。陰山ら¹は、日本の地球シミュレータの4096個のプロセッサを使い、 10^{-7} に近いエクマン数で、活発に対流するダイナモモデルを走らせた。

まだ8桁の隔たりがあることを考えると、これは小さな前進にすぎないように思われるかもしれない。けれども、高エクマン数でのシミュレーションが、より現実的な条件でのシミュレーションと定性的に同じ結果を生じうるのかどうか、あるいは、エクマン数を下げることで大きな違いが生じるのかどうかを明らかにするためには、こうした努力が重要なのである。これまで低エクマン数では、渦の円柱が細くなり、数が増えると予想されていた。けれども陰山らは¹、流れの幅が薄くなり、キノコの軸から広がる傘のひだのように、地球の自転軸から放射状に広がる薄いシート状になるという結果を得た。同様のパターンは、実験室の対流実験でも観測されている⁶。地球のコアの流れが円柱状ではなく長いシート状になっているなら、コアの上部から出ている磁束のローブについての解釈を考えなおさなければならない。

陰山らのシミュレーション¹は、薄くなった流れのパターンが、まだ効率的なダイナモとして機能することを示唆している。地球ダイナモのシミュレーションを可視化する従来の方法では、得られた磁力線をマッピングしていた。複雑なダイナモでは、これはしばしばボウルに入ったスパゲッティのようになってしまい、解釈するのは困難である。陰山らは今回、電流の流れをマッピングすることにより、よりわかりやすい画像を作り出した。この画像からは、電気工学で用いられるコイルに似た構造が多数生じていることが明らかになった。しかし、このモデルが作り出す磁場は、地球が作り出しているような双極子磁場ではなかった。

極端に単純化された変数から成る地球ダイナモのモデルが地球の磁場をよく再現し、条件をより現実近づけると食い違いが生じてくるというのは、なんとも気分が悪いことである。この食い違いについて提案されている説明は、今日のコンピュータの限界に近いところでシミュレーションを行うことに伴う問題を際立たせる。このシミュレーションを走らせるには何か月もの時間を要したが、それでもモデル化された2000年という時間をカバーできたにすぎない。地球のコアの流れが突然停止したとしたら、双極子磁場が減衰するまでに2万年はかかるだろう。同じ

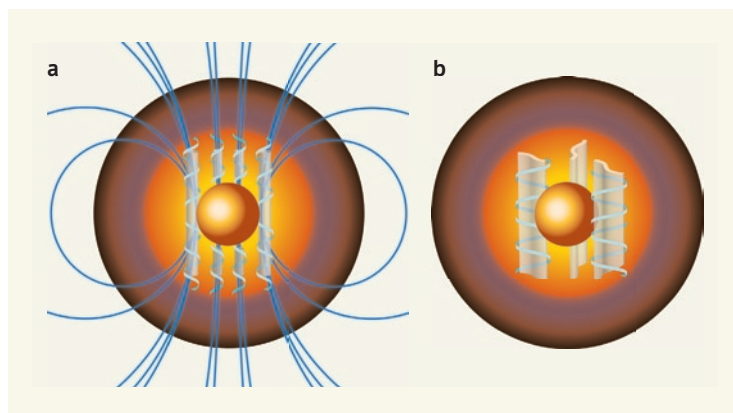


図1 2種類の地球ダイナモ。地球の磁場は流体の外核で発生する。a, 従来は、外核の液体鉄は南北方向に並んだ円柱状の経路の中を、らせんを描いて循環し、これにより発生する電流が双極子磁場を作り出すと考えられていた。コアの上部の地球磁場にみられる強い磁気ローブは、磁力線が高気圧性渦(高気圧領域の周囲の空気と同じ向きに回転する渦)へと集中することにより説明できると考えられていた。b, 陰山ら¹のコンピュータ・シミュレーションは、コア中の流れのパターンが薄いシート状になっていることを示唆して、従来の概念に疑問を投げかけた。シート状の流れは効率よく磁場を発生させることができるが、これがどのようにして地球の双極子磁場につながっていくのかは、まだわかっていない。

磁場をゼロから作り出すためには、これと同程度の時間が必要になるだろう。この過程を再現しようと思ったら、コンピュータを数か月どころか数年間も走らせる必要がある。その上、地球ダイナモのモデルにおいて非現実的な値を設定しなければならない変数はエクマン数だけではない。例えば、磁気プラントル数(粘性率と電気抵抗の比)はシミュレーションでは1と設定されているが、実際のコアでは約 10^{-6} である。

実際のコアの条件を使って地球ダイナモをモデル化するのは、当分の間は不可能だろう。地球のような磁場をもつモデルを作成するための秘訣は、「適当な割合で間違っている」変数を用いることにあるのかもしれない。そうだとすると、変数を現実の値に近づけていく過程で、変数どうしの関係の中のどれを維持していくかが問題になる。陰山ら¹は、従来のシミュレーションでは近づけなかった領域に分け入った。次のステップは、さらに過酷なものになるだろう。それは、この新しい領域を偵察し、変数空間を通り抜けて理解にたどり着くための正しい道筋を見極めることである。 ■

Ulrich R. Christensen、マックス・プランク太陽系研究所(独)

1. Kageyama, A., Miyagoshi, T. & Sato, T. *Nature* **454**, 1106-1109 (2008).
2. Busse, F. H. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* **42**, 437-459 (1975).
3. Kageyama, A. & Sato, T. *Phys. Rev. E* **55**, 4617-4626 (1997).
4. Olson, P., Christensen, U. & Glatzmaier, G. A. *J. Geophys. Res.* **104**, 10383-10404 (1999).
5. Gubbins, D. & Bloxham, J. *Nature* **325**, 509-511 (1985).
6. Sumita, I. & Olson, P. *Phys. Earth Planet. Inter.* **117**, 153-170 (2000).