

# 自己組織化・複雑性の典型例としての 地磁気ダイナモ

独立行政法人 海洋研究開発機構

地球シミュレータセンター

陰山 聡

## 1. はじめに

地球磁場の観測データを分析すると、双極子成分が卓越し、他の高次成分は弱い。つまり、地磁気は地球中心に置かれた双極子モーメントが作り出す双極子磁場でかなりよく近似される。ここまでは、ガウスの時代に既に確認されていた古い事実である。だが、その磁場の物理的な起源が液体金属を媒質とした電磁流体発電、つまりMHDダイナモであることがはっきりしたのは比較的最近のことであった。

MHDダイナモ自体はそれほど複雑なプロセスではない。その本質は、磁場中を流れる電磁流体に起電力が働き、その結果生まれた電流が、もとの磁場を強める方向に流れるということである。地球内部には核と呼ばれる領域があり、2層構造になったその核の外側部分は外核とよばれる。外核は（高温のために）溶けた液体状態の鉄でできている。外核中の液体鉄が熱などによる浮力によって対流運動をし、MHDダイナモ作用を通じて磁場を生み出している結果が地磁気なのである。

自然界における巨大な電磁流体システムとしての地磁気を見たとき、不思議な点が二つある。一つは、それが双極子磁場であるということ。そしてもう一つは、南北の極性がこれまで何度も逆転してきたということである。

この宇宙には磁気単極子が存在しないとすれば、磁場が取りうる最も単純な3次元構造は双極子磁場である。液体鉄の粘性は低く、外核のサイズが大きい（半径約3480km）ので、レイノルズ数は非常に高いであろう。地球外核の液体鉄は、おそらく高い乱流状態にあると考えられる。乱れた流れが生み出すダイナモ作用で生じた磁場が、結果として最も秩序だったものになっているわけで、これは自然界における自己組織化の最も身近で印象的な例と言えるのではないだろうか。

その双極子磁場が、これまで（平均すると）数十万年に一度、何度も繰り返し逆転してきたということは、様々な地球科学的データが示すことであり、おそらく間違いない。その逆転過程はゆっくりとしたものではなく、地質学的な時間スケールで言えばほぼ一瞬と言えるほど短いものである。さらに不思議なのは、その逆転の周期が一定のものではなく、むしろランダムなものだということである。

複雑性を探求する科学ではしばしば間欠性がキーワードになる。地磁気を示すこのような間欠的な逆転現象から、地球磁場は複雑現象の典型例としてもみなすことができる。

我々は、自己組織化及び複雑性現象の一つの典型例として地球ダイナモをとりあげ、大規模な計算機シミュレーションを通じて研究してきた。その結果、これまでに双極子磁場の生成やその非周期的な逆転現象を定性的に再現することに成功した。

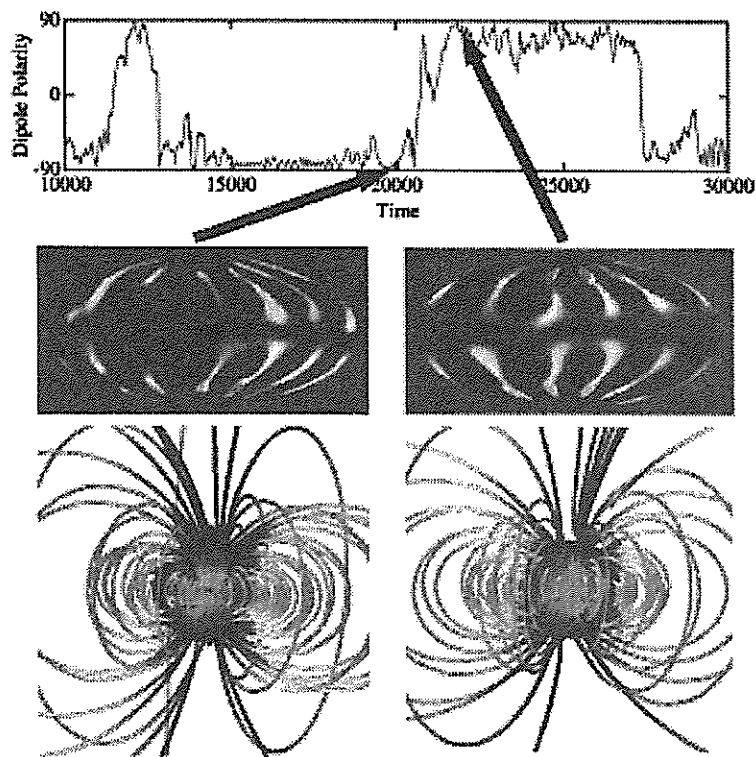


図 1

## 2. シミュレーションモデルと結果

地球ダイナモの舞台は外核（半径 1220 km から 3480 km）なので、我々はこのような球殻状の領域を抜き出して考える。中心の位置が同じで、半径が異なる二つの球面を考え、それが入れ子状になっているとする。内側の球面は高温、外側の球面は低温にそれぞれ温度が一定に保たれている。そして球の中心方向に重力が働いている。このような球殻状の容器のなかに電気伝導性の流体（MHD 流体）が入っている。系全体は一定の角速度で回転している。つまり、我々が考察する物理系は回転（自転）する球殻状の容器内部の磁気流体の熱対流運動で、比較的単純な物理系と言える。

磁場を考慮に入れない普通の熱対流の問題としての回転球殻系というのは昔から研究されていた。そして、その対流の流れ場が作る空間構造（いわゆる対流胞）が、自転軸に方向に平行にそろった円柱状となること等は既に解明されていた。

我々はMHDシミュレーションを行った結果、磁気流体においても回転球殻中では円柱状の対流胞構造が生成され、その流れ場がMHDダイナモ作用を持つこと、そしてダイナモ作用によって生み出された磁場は双極子磁場が卓越することを確認した。そして、シミュレーションデータを様々な可視化手法を駆使して詳細に解析することによって、双極子磁場がいかんして生まれるかという、その物理機構を解明することも出来た。それは、円柱状の対流胞構造と、その内部の螺旋型の流れ、そして磁気リコネクションのプロセスが互いに調和的に働くものである。

我々はさらに、双極子磁場が突然反転する現象を計算機内部で再現することにも成功した（図1）。その反転は何度も繰り返され、周期は一定していない。これはまさに地磁気で確認されている性質である。さらに、我々のシミュレーションが示すところによれば、外核の磁場のエネルギーは二つのレベル（高エネルギー状態と低エネルギー状態）が存在し、逆転が起きるのは磁場エネルギーレベルが高い状態にある時に限られるらしい。また双極子モーメントの逆転に先立って（弱いながらも存在する）8重極モーメントの逆転が前兆現象として示される可能性がある。

### 3. まとめ

地球ダイナモは自己組織化・複雑性現象の典型例である。我々は計算機シミュレーションによってその定性的な再現に成功し、双極子磁場が生成される物理機構を解明した。

