

地磁気と地球ダイナモ

東京大学大学院理学系研究科助手 さくらばあたる 櫻庭 中

1. 電磁石としての地球

地球の磁場(地磁気)の存在は、方位磁針などをもちいて身近に知ることができる。地磁気というのは静的で、常にそこにあるものというふうに思われがちだが、実際は、後述するように、地球内部のダイナミックな活動を反映し、生々流転している。これは他の惑星でも同様で、固有磁場の存在から、逆に惑星内部の活動のようすを推定することもできる。

地磁気の源は、鉄を主成分とする金属コア(半径3480kmで、地球半径の半分強を占める)に流れる電流である。地球深部はキュリー点を越える高温状態にあり、永久磁石ではありえない。だから地球は大きな電磁石といえる(図1)。方位磁針がどこでもほぼ北を指すことからわかるとおり、地磁気は、地球中心に棒磁石を南北方向に置いたときの磁場、すなわち軸双極子磁場として近似でき、その双極子モーメントは $8 \times 10^{22} \text{A} \cdot \text{m}^2$ ほどである。たとえば半径3000kmの円形回路をコアの中に想定すると、そこに流れるべき電流は約30億アンペアになる(回路の面積に電流を乗じたものが双極子モーメントである)。ただ実際はコア全体にばらけて電流が流れるので、電流密度にすると1平方メートルあたり1ミリアンペア程度にすぎない。

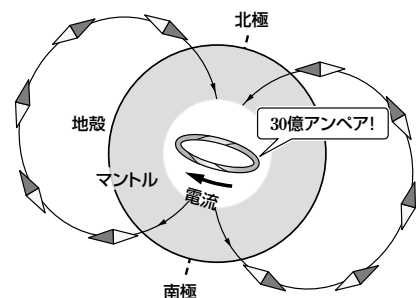


図1 地磁気をつくっているのは電磁石

2. 自励ダイナモ

電磁石とはいっても、電磁気的なエネルギーが外部から注入されているわけではない。電流も磁場も、コアが自前で作りだしているのである。一般的に

発電機(ダイナモ)が永久磁石の助けを借りて起電力を得ているのとは明らかに異なる。地球のコアで生じているような特殊な発電のしくみは自励ダイナモとよばれる。そもそも電磁誘導によって起電力を得るには、コアは運動しなければならないが、剛体回転では自励ダイナモにはならない。そこでもっと複雑な運動が必要になるが、幸いにして、コアを構成している鉄は、地球深部の高温下では大部分が融解しており、水と同程度の粘性率をもつ。実際コアは、内部の熱をマントルに運ぶべく対流しており、その流速は 10^{-4}m/s のオーダーと推定されている。

自励ダイナモの原理を説明する最も簡単なモデルが円板ダイナモである(図2)。これは導体の回転円板とコイルとからなる。はじめに微弱な初期電流 I を仮定する。コイルは磁場をつくり、それは円板をも貫く。円板は磁

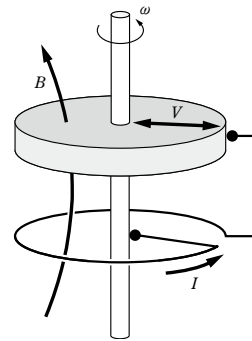


図2 円板ダイナモの模式図

場を横切るように回転しているので、動径方向に誘導電場が生じる。円板を貫く磁束を Φ 、回転角速度を ω とおくと、起電力は $V = \omega \Phi / 2\pi$ であり、これが回路全体の電気抵抗 R による電圧降下に打ち勝てば、電流は指数関数的に増加していく。半径 a の円板を貫く磁束はおおむね $\Phi \approx \mu_0 a I$ であるから、自励ダイナモの発生条件は

$$a\omega > 2\pi R / \mu_0 \quad (1)$$

である(μ_0 は真空の透磁率)。左辺は円板の運動速度であるが、これはコアの流速と対比することができる。そこで式(1)の右辺を典型的なコアの流速 10^{-4}m/s 以下にしようとする、 $R < 2 \times 10^{-11} \Omega$ でなくてはならない。電気抵抗は電流の流れる距離に比例し、流れる断面積に反比例する。鉄の抵抗率は $10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ほどであるから、一辺1000kmの鉄の塊ならば、その抵抗は $10^{-12} \Omega$ となり、条件(1)を

じゅうぶんに満たすだろう。コアの流れは実に遅々としたものだが、にもかかわらず宇宙空間に磁気圏を張り出すほどの立派な磁場をつくりだしているのは、ひとえにその巨大さゆえである。

3. コアの運動と地球ダイナモ

地球のダイナモ作用の研究は長らく理論的な枠組みを出ななかったが、1990年代後半になって大規模な数値計算が可能になり、その具体的なメカニズムがようやくわかりかけてきた。地球ダイナモを駆動する源は、地球の冷却熱である。コアやマントルの深部は1億年で10度くらいの割合で冷えている。コアの表層部は冷却されると熱収縮により密度が高まり、コアの底に沈もうとする。いっぽう中からは熱く軽い液体が湧き上がり、熱をマントルに逃がす。これを熱対流とよぶ。冷却熱が液体鉄の力学的エネルギーを生み、さらにそれが磁気エネルギーに変換されるのである。

コアの流れは、大気の流れと似ている。大気に高気圧と低気圧とがあるように、コアにもそうした渦がいくつも存在する。たとえば赤道断面を北から眺めると、時計回りの渦が高気圧であり、そこでは内向きのコリオリの力(地球の自転に伴う見かけの力)と外向きの圧力傾度力とがつりあっている。このような渦の構造は、自転軸方向にあまり変化せず、2次元的なロール状の渦として発達する。それに加えて、高気圧では赤道面から離れる向き、低気

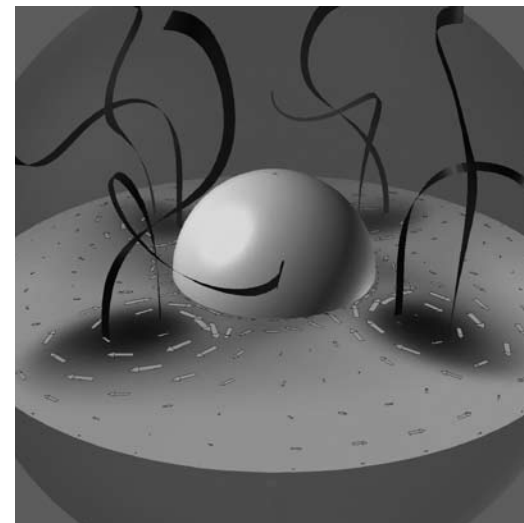


図3 コアの流れのシミュレーションの例

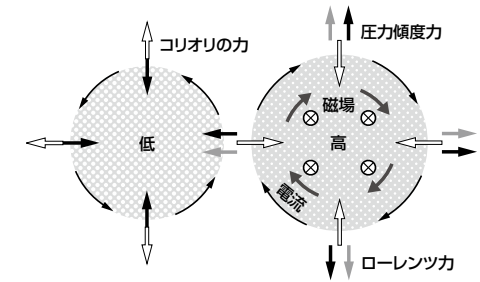


図4 赤道面での渦のようす

圧では赤道面に向かう向きの、自転軸に平行な流れも生じ、結果として渦を取り巻く流線はらせん状になる。このようなロール状の渦の存在が、軸双極子磁場の効果的な生成に寄与している。ここではとくに赤道面付近に着目してみよう。計算機シミュレーションによると、赤道面を南向きに貫く磁力線は、高気圧の内部に選択的に閉じ込められ、電流は、渦の流れと同様北から見て時計回りに流れる。と同時に、高気圧は低気圧に比べて大きく発達する(図3)。これは高気圧ではローレンツ力がコリオリの力を相殺する向きに作用するためである(図4を参照。コリオリの力は熱対流を妨げる性質をもつが、それが磁場によって打ち消される)。また高気圧内の磁場は、赤道面から離れる向きの2次元的流れによって引き伸ばされ、強められる。高気圧を取り巻く仮想の回路の半径は流れに乗って縮小するが、レンツの法則により磁場を強める向き(時計回り)に起電力が生じるからである。これは地球のダイナモ作用の一部にすぎないが、赤道面を貫く磁場を強めるということは、双極子磁場の維持と直接結びついている。

人間の時間感覚では地磁気の向きや強さはほとんど変化しないが、地質学的な時間スケールでは、熱対流の間欠的なふるまいに応じて、複雑に変化する。その最も顕著な例が、磁場の向きが 180° 変わる、地磁気の逆転である。最も最近には、それは70数万年前に起こった。円板ダイナモには電流の向きが逆の解も存在することからもわかるように、逆転そのものはありうる現象ではあるが、現在もなお、その詳しいメカニズムは不明である。またコアの対流運動はきわめて乱流的であり、それ自身興味深い研究対象である。地磁気だけでなく、ほかの星の磁気もまた、まだまだ多くの不思議をわれわれに与え続けている。