

2. 地球シミュレータの応用

固体地球

地球科学的にみれば、地球の内部は固体というよりも、むしろ流体に近い。地球の中心近くに存在する外核と呼ばれる領域は液体状の鉄でできているし、その外核の周囲をとりまくマントルは固体（岩石）だが、10cm/年のオーダーのゆっくりとした速度で熱対流運動をしている。外核中の液体鉄も対流運動をしており、そこでの電磁誘導によって外核が一種の発電機として働いている結果、地球の磁場ができています。コンパスが北を指すのは、このためである。またマントル対流は、プレートテクトニクスとして知られる地球表面のプレート運動の源であり、多くの地震・火山活動はこのプレート運動の帰結である。本稿では、固体地球科学の多彩な研究テーマの中から、地磁気の起源の解明を目指した計算機シミュレーションを中心に紹介する。

固体地球科学からみた地球

■ 地球の構造と対流運動

地球の内部は図-1のように、卵のような3層構造になっている。卵の黄身にあたる地球の中心部分はコアと呼ばれる。コアはほぼ純粋な鉄である。コアの外側にある白身の部分はマントルと呼ばれ、これは岩石である。そして地球の表面はプレートと呼ばれる薄くて硬い層によって覆われている。固体地球科学とは、コア、マントル、プレートの構造とダイナミクスを研究する分野である。

「固体」地球という言葉は、動きや変化のまったくない、堅いイメージを抱かせるが、実は地球内部は流れと動きに満ちあふれている¹⁾。そのエネルギー源は、原始地球が約46億年前に形成された時に蓄えられた大量の熱と、地球内部に今でも遍在する放射性同位元素の崩壊による熱である。地球は、現在でもその表面を通じて冷たい宇宙空間に大量の熱を捨て続けている。その全熱流束は約44テラワット^{☆1}と見積もられている。

内から外に向かって大量の熱を常に流し続けている地球は、一種の熱機関であり、いわば、ぐつぐつと煮立った鍋のようなものである。一般に、熱によって駆動される流体運動は熱対流と呼ばれる。地球内部には大きなスケールの熱対流が2種類ある。1つはコア内部の液体鉄の対流、そしてもう1つはマントルの対流である。

■ 固体の対流：マントル対流

地球の半径は約6,400km、コアは約3,500kmである。したがって、体積でいえばコアは地球の約16%しか占めない。残りのほとんどすべてがマントルである。つまり地球はほぼマントルでできているといっているだけで、そのマントルが対流運動しているという事実は、地球の構造と進化を理解する上で欠かすことのできない重要な要因である。

地球の表面は、マントル対流の上側にできた境界層

☆1 1,300Wの家庭用ホットプレートが約340億枚分。

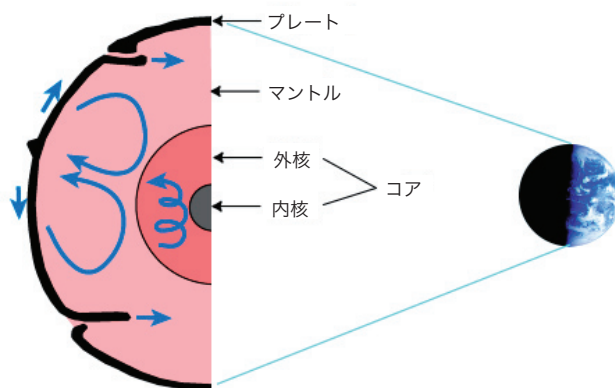


図-1 地球の構造

だと解釈することができる。この境界層は硬く、1億年以上の（つまりマントルが流体として振る舞うくらいの）長い時間スケールでみても剛体的な振舞いをする。この薄くて硬い板状の領域がプレートである。地球表面は大きく分けて十数枚のプレートで覆われており、そのプレート同士がこすれ合ったり、相手の下にもぐり込んだりするところで地震や造山活動、火山活動などが起きていると考えられている。これが有名なプレートテクトニクス理論である。したがって、プレートテクトニクスはマントル対流理論の一部として理解されるべきであるが、その統一的記述（あるいはシミュレーション）に成功した者はいまだいない。固体地球科学の最前線の1つがここにある。

岩石物質でできたマントルが対流運動をする、つまり流れるというのは、それほど不思議なことではない。十分に長い時間スケールでみれば、固体も流れ得るということは、氷河を思い出せば理解できるであろう。現在では、GPS等の技術を使って、プレートの移動速度が実測されており、その速さは1年間で数mmから十数cmである。したがって、マントルも十数cm/年程度の速度で流れていると考えていいだろう。十数cm/年という速度は、地球科学的な時間スケールでみれば決して遅いものではない。「たった」1億年で地球を1周できるほどのスピードだからである。最近では、地震波を利用したコンピュータトモグラフィー²⁾等の洗練された手法によって、地球内部を間接的に見る事が可能になっているが、マントル対流の流れ場を直接知ることは今のところ不可能である。したがって、マントル対流の基本的描像、特にその深部（コアに近い部分）の流れがどうなっているのかなど、基本的なことさえいまだに分かっ

ていないのが現状である。

現在、マントル対流の数値シミュレーションが盛んに行われており、我々のグループでも挑戦している。マントル対流の流れを記述する基本方程式は、水などの流体現象を記述する非圧縮Navier-Stokes方程式と基本的には同じものである。ただし、マントル物質の粘性率は水とは桁違いに大きい（20数桁以上）ことや、さらにその粘性率が温度に強く依存する点が、その計算機シミュレーションを難しくしている。

■ コア対流：地磁気の起源

地球内部に存在するもう1つの巨大な対流系がコアの対流である。コアは、地球中心部に位置する半径約3,500kmの鉄の球である。コアは内核と外核とよばれる2層に分かれている。内核は、半径約1,300kmの球で、固体状態にある。一方、外核は内核の外側に位置し、液体状態である。地球内部は高温なので、外核では鉄が溶けて液体になっているのだが、地球中心部にある内核は高压のために固化しているのである。コアの対流運動とは、外核の液体鉄の対流運動のことを指す。外核を外側から覆うマントルが、対流によってコアから熱を常に奪い、冷やしているため、外核の液体鉄が熱対流運動をする。外核の流れの駆動源として（組成対流等の）熱対流以外の候補も考えられてはいるが、本質的な違いはないであろう。地球科学上重要な点は、外核の液体鉄という電気伝導性の流体が流れることによって地磁気が生まれているという事実である。

地磁気（地球の磁場）は、地球の中心に置かれた1つの双極子モーメントでよく近似できることが昔から知られていた。この意味で、コンパスが北を指すのは

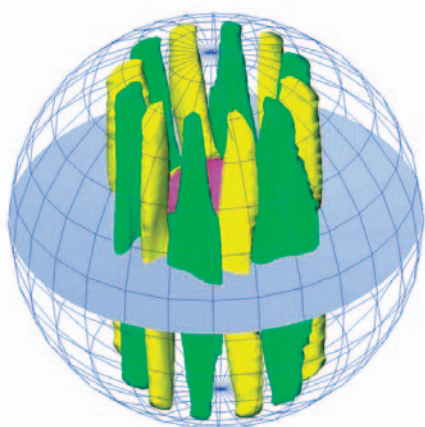


図-2 渦度でみたコアの対流構造

地球全体が磁石になっているからだということもできるが、しかし地球中心部のコアに巨大な永久磁石が埋もれているわけではない。永久磁石はキュリー温度とよばれる温度以上になると磁性を失うので、地球中心部のような高温状態には永久磁石は存在し得ないのである。地磁気は永久磁石ではなく、電磁誘導による電流から生み出されている。つまり、対流運動をしている外核の液体鉄が、一種の発電機（ダイナモ）としてはたらき、自分自身の内部に電流を流しているのである。その電流が、全体としてみれば赤道方向に1周回するようなループ状の電流となっているので、結果として地球の双極子磁場が生成されている。このような地磁気の成因説は地磁気ダイナモ理論とよばれ、長年、理論的な考察と不十分な数学的解析しかなかったが、この10年ほどで計算機シミュレーションによる研究が爆発的に進展した。

地磁気の起原解明を目指した計算機シミュレーション

■ 地磁気の謎

地磁気の起原解明を目指して我々が行っている地磁気ダイナモシミュレーションを説明する前に、現実の地磁気のどのような点が興味深いのかをまとめておこう。上に述べたように地球の磁場はほとんど純粋な双極子磁場である。何よりもこれが不思議なことである。外核の液体鉄の対流運動をエネルギー源として、何らかのメカニズムによって流される電流は、それがどんなに複雑な空間分布を持ってもおかしくはない。ところが、実際の地磁気が双極子磁場であるという事実は、生成される電流

(あるいは磁場)が、シンプルな構造を自発的に形成し、維持し続けていることを意味する。この宇宙には単極子(モノポール)は存在しないので、双極子磁場は自然界で磁場がとり得る最も単純な構造である。したがって、地磁気は、自然界における自己組織化現象の最も身近で、不思議な例の1つだといえるだろう。

さらに、さまざまな観測事実から、地球の双極子磁場は過去にその南北の極性を何度も逆転してきたことが分かっている。逆転にかかる時間は地球科学的には非常に短く、突然くると逆転すると表現してよい。最近の逆転は約70万年前に起きた。もしもコンパスを持ってその時代の少し前に行くことができれば、コンパスのNと書かれた針は、今とは逆に南を指すことだろう。地磁気の逆転は平均すれば二、三十万年に1度起きていることがデータから分かっているが、その逆転は決して周期的ではなく、むしろランダムに近い。地磁気の双極子モーメントのこのような逆転現象がなぜ起きるのかというのが、地磁気に関するもう1つの興味深い点である。

■ 地磁気のシミュレーション

我々は地磁気現象の再現と理解を目指した計算機シミュレーションを行っている。シミュレーションのモデルは次のように比較的簡単なものである。外核を想定し、2つの球面に挟まれた球殻状の容器を考える。内側の球面は内核、外側の球面はマントルとの境界である。対流の駆動源の詳しいことは未知なので、簡単な熱対流を仮定し、内側の球面は高温、外側の球面は低温に固定する境界条件を与える。この球殻状の容器に外核の鉄を想定した電気伝導性の流体が入っているものとする。そして球の中心方向に向かって重力がはたらき、系全体は一定の角速度で回転(自転)しているものとする。

電気伝導性流体の運動は、磁気流体力学(Magneto-hydrodynamics, MHD)方程式で記述される。これは、流体の速度場と、磁場の時間発展を記述する方程式である。これに温度場の時間発展方程式を結合させたものが基本方程式である。すべての空間微分を差分化し、時間方向にはルンゲ・クッタ法等の時間積分法を使って時間発展を追跡していく。これが地磁気ダイナモのシミュレーションである。

まずは、外核中の対流運動がどのような構造を持っているかを述べる。図-2は、対流の構造を渦度の等値面(正確には渦度の南北方向成分の等値面)で表したもの

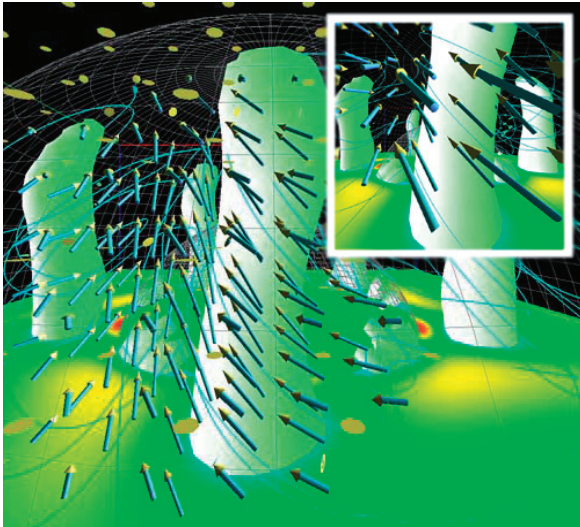


図-3 流れのベクトルでみた対流構造

である。緑色と黄色で色づけした柱のような構造が対流の空間構造の基本単位（対流胞）である。ベナールセルとよばれる六角形型の対流胞構造が板状の流体の熱対流運動で現れることは有名であるが、回転する球殻容器内では、このように回転軸方向に伸びた円柱状の対流胞が形成されるのである。これは回転による強いコリオリ力の効果である。コリオリ力は、流れが回転軸方向に常に巻き付くように作用するので、対流運動がこのように回転軸方向にまっすぐ伸びた円柱状の構造を持つようになる。この円柱状の対流胞を我々は対流柱とよんでいる。対流柱には図-2で黄色と緑色に示したように2種類ある。これは低気圧柱と高気圧柱である。低気圧柱では、流体が地球と同じ方向に回転する運動をしており、高気圧柱では、逆方向に回転している。

さらにこの対流運動の細部を観察してみよう。図-3は、高気圧柱（ここでは白い柱）の周囲の流れの様子を見るために矢印を表示させたものである（ちなみにこの図は本特集第2.4章「仮想地球」の可視化とその表現」で述べられているCAVE型VR装置BRAVEを用いてデータを解析している時のスナップショット2枚である。実際の映像はステレオである）。この図に示されているように高気圧柱内部および周囲の流体は、単なる回転運動だけではなく、回転軸に平行な方向の成分も持っていることが分かる。つまり流体は螺旋型の流れをしている。詳しく見ると、高気圧柱でも低気圧柱でも、北半球では左巻きの螺旋を描き、南半球では右巻きの螺旋を描いていることが分かっている。実はこの螺旋型の流れこそが、

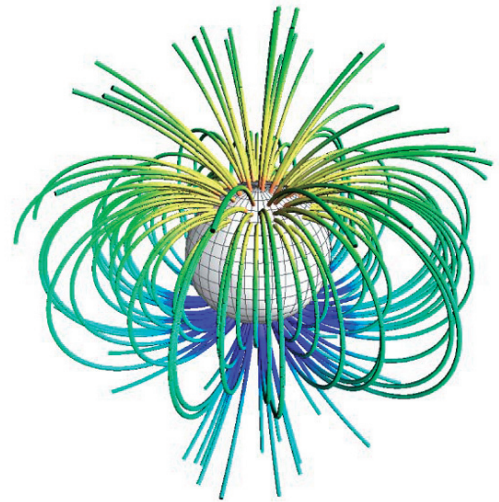


図-4 シミュレーションによって生成された磁力線

双極子磁場を作り出す鍵となっているのだが、その点を詳しく説明する余裕は残念ながらない。双極子磁場がいかにして生成されるかを説明した論文は文献3)である。我々のシミュレーションによって得られた双極子磁場を図-4に示した。

このように現在では、外核中の電気伝導性の流体（鉄）の熱対流運動によって、双極子磁場が自発的に生成される現象が、すでに計算機内部で再現され、そのメカニズムさえも解明されている。そしてさらにシミュレーションを続けると、この双極子磁場が突然、しかも繰り返して逆転する現象の再現にも成功している^{4), 5)}。したがって、定性的には地磁気の振舞いの重要な側面はすでに計算機の内部で再現することには成功しているといえる。しかし、計算性能の制限から、我々のものも含めて世界中のシミュレーションモデルでは、粘性係数などの重要な物性値を実際の地球のものとは大きく異なる値を使って計算しているので、その影響の有無を明らかにすることは今後の大きな課題である。

■ 陰陽（インヤン）格子

上に述べたように、地磁気ダイナモのシミュレーションでは、球殻ジオメトリの下でMHD方程式の時間発展を解いている。また、ここでは述べる余裕がなかったが、我々のグループで最近力を入れているもう1つの研究テーマであるマントル対流のシミュレーションでも、やはり球殻ジオメトリで流体の時間発展方程式を解く必要がある。我々はずっと有限差分法にこだわってシミュ

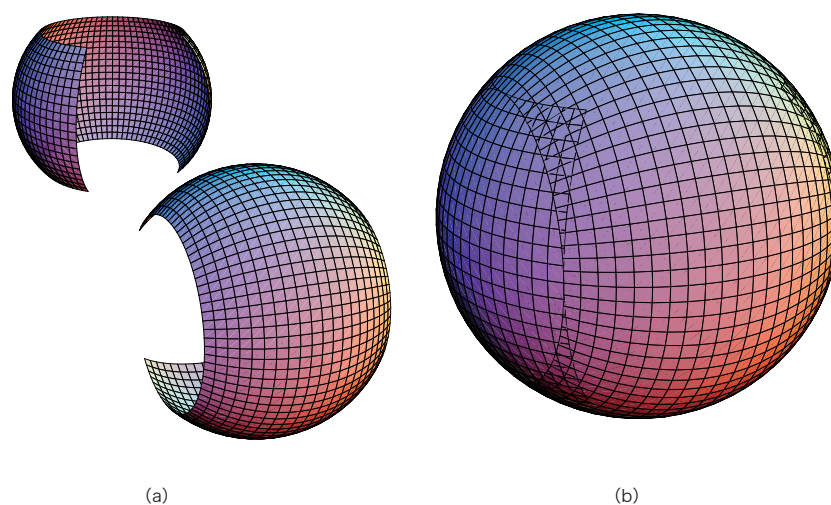


図-5 陰陽格子. (a) に示したような合同な2つの要素格子を組み合わせ、(b) のように球面全体を覆うキメラ格子の一種.

レーションを行ってきた。地球シミュレータのような大規模なベクトル・並列計算機では、スペクトル法よりも有限差分法の方が高速で計算できるので、これは自然な選択であろう。差分化するにあたり、少し前まで我々は普通の球座標上の格子系を用いてきた。これは、球面上に等間隔に引いた緯度線と経度線の交点をとった格子系である。しかしこの緯度経度格子系では、北極と南極近くに格子点が集まりすぎ、その分だけ低緯度部分（赤道近く）が粗くなるという欠点があった。これはシミュレーションの計算上効率が悪い。そこで今では、地磁気とマントル対流のどちらのシミュレーションも、我々が考案した「陰陽（インヤン）格子」という新たな格子系を使って計算している⁶⁾。陰陽（インヤン）格子とは、図-5 (a) に示したような、緯度経度格子の低緯度部分の一部を抜き出した要素格子を2つ用意し、それを組み合わせて図-5 (b) のように球面全体を覆った格子系である。要素的な格子を複数合わせて計算領域全体を覆うこのような格子形成手法はキメラ法と呼ばれる。陰陽格子は球面上のキメラ格子の一種といえる。陰陽格子は優れた特徴をいくつか持っている：座標系が直交系なので計算が速いこと、並列計算のための領域分割が容易であること、2つの要素格子が等価であるためコーディングと計算が効率的であること、等である。陰陽格子は、地磁気やマントル対流のシミュレーションだけでなく、大気・海洋のシミュレーションにも応用されている（本特集第2.2章「全球・非静力・大気海洋結合シミュレーションコードの開発」を参照）。

今後の展望

固体地球シミュレーションにおける今後の重要なテーマとして、プレートの形成とダイナミクスを自然に包含したマントル対流シミュレーションの実現が挙げられる。また、地球内部の2つの重要な対流系、コア対流とマントル対流は独立ではなく、互いに影響を及ぼし合っていると考えられる。地球内部のダイナミクスを完全に理解するためには、地球内部全体を一種の結合対流系として統合的にみることが鍵となるであろう。このような観点から、我々のグループでは現在、コア対流シミュレーションとマントル対流シミュレーションを結合させた統合シミュレーションコードの開発に取り組んでいる。

参考文献

- 1) 鳥海光弘 他：地球内部ダイナミクス，岩波書店（1997）。
- 2) 川勝 均 編：地球ダイナミクスとトモグラフィー，朝倉書店（2002）。
- 3) Kageyama, A. and Sato, T.: Generation Mechanism of the Dipole Field by a Magnetohydrodynamic Dynamo, Phys. Rev. E, Vol.55, pp.4617-4626（1997）。
- 4) Kageyama, A., Ochi, M. M. and Sato, T.: Flip-Flop Transitions of the Magnetic Intensity and Polarity Reversals in the Magnetohydrodynamic Dynamo, Phys. Rev. Lett., Vol.82, pp.5409-5412（1999）。
- 5) Li, J., Sato, T. and Kageyama, A.: Repeated and Sudden Reversals of the Dipole Field Generated by a Spherical Dynamo Action, Science, Vol.295, pp.1887-1890（2002）。
- 6) 陰山 聡：陰陽格子の開発，第17回数値流体力学シンポジウム講演要旨集，p.246（2003）。

（平成15年12月5日受付）

