

コンパスはなぜ北を指すのか？

陰山 聡 (海洋研究開発機構地球シミュレータセンター, 九州大学総合理工学研究院)
かげやま あきら kage@jamstec.go.jp

地球の中心近くには液体金属でできた核があり、そこには数十億アンペアにも達する莫大な電流がリング状に流れている。地球が自分自身で作り出しているこのリング状電流が現在は西向きに流れているので、コンパスのN極の針は北を指すのだが、約78万年前にはこの電流は今とは逆に東向きに流れていた。つまり地磁気は反転したのである。地磁気の反転は過去何度も起きたことが確認されている。スーパーコンピュータと計算機シミュレーションの進歩によって地磁気の起源とその反転に関する研究は最近10年間で大きく進歩した。

夏目漱石の「吾輩は猫である」には寺田寅彦をモデルにした若い学者の寒月さんが出てくる。あるお金もちの夫人が“猫”の主人である苦沙弥先生に、寒月さんの大学での専門を尋ねるシーンがある。苦沙弥先生は「大学院では地球の磁気の研究をやっています」と答えるが、夫人にはその意味がわからない。「それを勉強すると博士になれまじょうか？」と聞く。

私も大学院生時代から「地球の磁気の研究」をしている。指導教官からこの問題を博士論文のテーマとして与えられたあと何度か壁にぶつかり、その度に「それを勉強すると博士になれまじょうか？」と聞いてみようかと思ったものである。

揺れるコンパスの針

電車のホームで方位磁石(コンパス)を持って見ていると、針がフラフラと揺れるのに気がつくであろう。電車は電気力で動くものだし、電流は磁場をつくるのだから、いつもは北を指すコンパスのN極の針が、電車のモーターを動かす電流の影響で北を指さなくなることは当然のことである。電車が近づいたときだけでなく電車がホームから見えないくらい遠いところにいるときでも、

やはり針はフラフラと揺れる。電車を駆動する電流はレールと架線を伝わって流れているので、たとえ電車が遠くにあっても、目の前のレールと架線には電流が流れている。その電流がつくる磁場がコンパスの針を揺らしているわけである。電車を動かすには数千アンペアの電流が必要らしい。家庭用の契約電流は数十アンペア程度だから、これはかなり強い電流と言える。その電流が電車の加速や減速に伴って増減し、それに応じて周囲の磁場が変動する。その強さが地球の磁場(地磁気)と同程度の強さになっていて、いわば対等な「ちから比べ」をしているために、コンパスの針のN極は北を指したり指さなかったりする(図1)。

地球の磁場も電流が作り出している。その電流はわれわれの足下を流れている。目の前の架線、わずか数m程度の近きにある数千アンペアの電流と同じ強さの磁場を作り出しているわけだから、この「地下電流」がもしも深いところにあるとすれば、それだけその電流は強いはずである。実のところこの地下電流はかなり深い。「地下」という表現が適切でないほどである。なぜならそれは地球半径の半分以上もの深さだからである。

地球を巨大なナイフで半分切ると、ちょうど

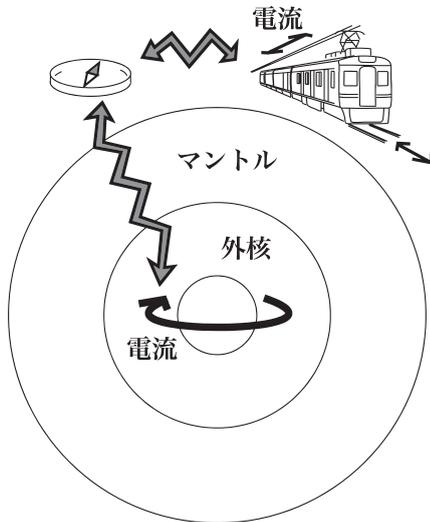


図1—駅のホームで見たコンパスはフラフラと動いて、北を指したり指さなかったりする。これは架線やレールを流れる電車の駆動電流と、地球の外核中を流れる電流が同じ強さの磁場をつくっているためである。このことから外核中の電流の強さを概算することができる。

ゆで卵を切ったような断面が見られるはずである。地球の中心部分、ゆで卵で言えば黄身に相当する部分は地球の核とよばれる。核の外側、白身の部分はマントルである。卵と同じように地球の一番外側には薄くて固い殻(地殻)がある。地殻に覆われたマントル層の厚さは約2900 kmと分厚い。

地上のコンパスの針を北に向かせる地下電流はどこを流れているのだろうか？ 地殻とマントルの構成成分は岩石なので当然電気伝導度は低く、大きな電流が流れることはできない。したがって残るのは核である。

核は鉄でできている。惑星としての地球が形成されたときに融けた鉄成分が相対的な重さのために地球の中心に集まってできたものが核である。地球の半径約6400 kmに対して核の半径は約3500 kmである。

当初は全体が完全に液体状態だった核の鉄は地球が冷えるに従って次第に固化してきた。圧力の最も高い地球中心点から固化が進み、現在は核の半径のうち約1/3(1200 km)の部分が固体になっていて内核とよばれる。外側のまだ液体の部分は外核とよばれる。地球の深部、分厚いマントル層のさらに内側にある、いわば液体金属の海のようなこの外核こそが、地上のコンパスの針を北に向

ける電流が流れている場所である。

その電流はどのような分布をしているのだろうか？ よく知られている通り地球の磁場は双極子磁場でかなりよく近似できる。双極子磁場とは小さな棒磁石が周囲につくり出す磁場である。地球は北極がS極、南極がN極の双極子磁場になっているために地上のどこにいてもコンパスのN極の針が北を指す。このような双極子磁場をつくるのは、地球の中心近くで西向きに流れる円環(リング)状の電流である。

電車のレールや架線を流れる数千アンペアの電流がつくり出す磁場と、外核中を流れる円環状の電流がつくる磁場の強さが同程度だという事実を使って、この円環状電流の強さを概算することができる。レールのように直線状に電流が流れているとき、その直線からの距離を d とすると磁場の強さは d^{-1} に比例する。一方、外核中の円環状電流がつくる磁場が地球半径 R 上につくる磁場は、外核の断面積と R^{-3} の積に比例するので、結局外核中の円環状電流の強さはレールを流れる電流よりも R/d 倍程度強いことがわかる。レールまでの距離 d を6 m程度だとすれば R/d は 10^6 程度なので、外核中の電流はレールの電流(数千アンペア)の100万倍、つまり数十億アンペアということになる。このような莫大な電流が今この瞬間にも外核中を流れているわけである。もしもこの電流が止まれば、コンパスが北を指さなくなるからすぐにわかるはずである。

金属中を電流が流れると、電気抵抗のために電流は弱まる。いわゆるオーム散逸によって電流のエネルギーが熱のエネルギーに変わるためである。外核中の液体鉄の電気抵抗の値にもとづいて評価すると、この散逸時間はだいたい数万年程と見積もることができる。地球はその46億年の歴史を通じて、ほとんどいつも磁場を持ち続けていたことがわかっているから、たった数万年で磁場が散逸してしまうというのはおかしい。だから外核の電流をずっと供給し続けているメカニズム——発電機構——が外核には備わっていなければならない。つまり地球の外核は巨大な電磁石である

だけでなく発電所にもなっているはずである。

地球=巨大な発電所

磁場中で電気伝導体を動かすと、その動きと磁場のどちらにも垂直な方向に電場(起電力)が生じ、電流が流れる。火力や水力、原子力などを動力としてタービンを回し、磁場の中で金属を動かす——実際には回転させる——ことで電流をつくり出しているのが発電所である。あるいは金属のほうを固定して磁場を変動させてもよい。自転車で使われている小さな発電機ではそうになっている。自転車の発電機には回転する永久磁石が入っているが、大規模な発電所では巨大な永久磁石が使われているとは想像しづらい。実際、発電所では磁場をつくるのに永久磁石を使うのではなく、電磁石が使われている。その電磁石がつくる磁場の中で金属を回転させてつくり出した電流を送電線に送り出す一方、その(ほんの)一部を自分自身の発電に不可欠な電磁石の電流として再生させるというわけである。このような「磁場→(導体の)運動→起電力→電流→(もとの)磁場」というフィードバックループをつくっているのが発電所である。

地球の外核という「発電所」もまったく同じである。磁場中で金属(外核では液体金属)が動く、つまり流れることで起電力が発生し、それによって流れた電流が元の形の磁場をちょうど再現するようになっていけば、これは正のフィードバックシステムとなる。発電所と違うのは、人間のつくった発電機ではつくられた電流の一部を意図した通りに流れるようコイルを使って電流を誘導しているのに対し、外核中にはもちろんそのようなコイルなどはなく、自分自身で勝手に流れた電流系(と磁場)が自然と上述のフィードバックループを形成しているという点である。発電機のことを英語でダイナモ(dynamo)というので、外核の発電機構のことを地球ダイナモという。

エネルギーの観点から言えば、発電所とは要するに何らかのエネルギーを電氣的なエネルギーに

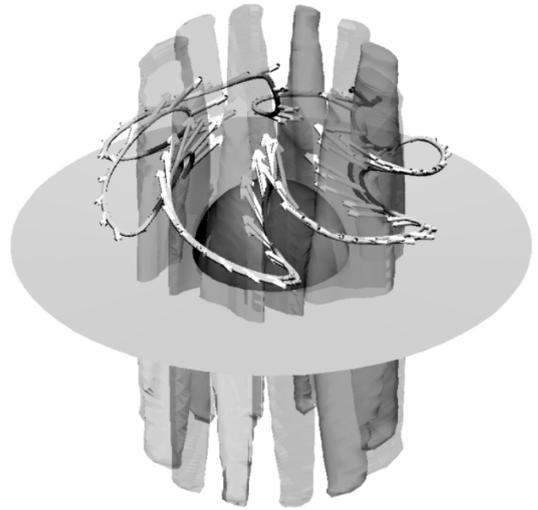


図2——シミュレーションから得られた外核中の対流構造と磁力線。円盤状の物体は外核の赤道面を表す。対流は地球の自転軸と平行にそろった円柱状の対流胞の集まりとして組織化されている。図中の磁力線には対流の流れを示した矢印が示されている。円柱状の対流胞の間に磁力線が引き込まれ、引き延ばされている様子がわかる。

変換する装置である。発電所では水力や火力、原子力などがエネルギー源になっている。では地球ダイナモのエネルギー源は何であろうか？ それは地球内部の熱である。

冷たい宇宙空間に浮かぶ地球は内部に大量の熱を込めた一種の熱いボールであり、内部から流れ出す熱を宇宙空間に放射し続けている。したがって地球内部の温度分布は半径の減少関数である。液体鉄の外核も、内側の境界面(内核との境界面)は相対的に温度が高く、外側境界面(マントルとの境界面)は相対的に温度が低い。このような温度差がある状況のもとでは内部の流体が熱対流運動をすることはよく知られている。

一般に熱対流運動は、対流胞とよばれる細胞のような基本単位が集まっているものとしてみなすことができる場合が多い。外核中の対流が通常の熱対流と違うのは、地球が自転しているために、その回転の影響を強く受けるという点である。そのために外核中の対流胞は自転軸に平行方向にまっすぐ伸びた円柱のような形をしている。図2で示した半透明の棒状のものは、外核中の対流構造を渦度の等値面で示したものである。これが円柱状の対流胞である。

外核の対流運動の駆動力としては熱以外の要因も考えられているが、いずれにせよ電気伝導体の流体が、自分自身でつくり出す磁場の中で対流運動することで起電力が生じ、その結果生じた電流が元の磁場をつくり出している。一般に、電気伝導性流体が流れることで働く発電機構を、磁気流体力学ダイナモあるいはMHD(Magnetohydrodynamics)ダイナモとよぶ。

その不思議な特性

ここで不思議なのは、外核の外に漏れ出る磁場——それこそが地上にいるわれわれが観察する磁場である——がなぜ双極子磁場になっているのかという点である。これがかなり乱れた、いわばグチャグチャの磁場形状であればそれほど不思議には思わないであろう。MHDダイナモの計算機シミュレーションをやってみるとまず驚くことは、MHDダイナモそのもの、つまり磁場の生成自体は比較的容易におきる現象だということである。計算機の中で電気抵抗の十分に低い流体を回転(自転)する系の中で熱対流運動させれば電流は簡単に発生する。だが多くの場合、その電流系は複雑な空間構造をしているので、外部でみられる磁場は双極子磁場のような単純な構造をもっていない。外核の中でMHDダイナモ作用によって発生した磁場が、なぜ自然に双極子構造をもつようになるのであろうか？ われわれは計算機シ

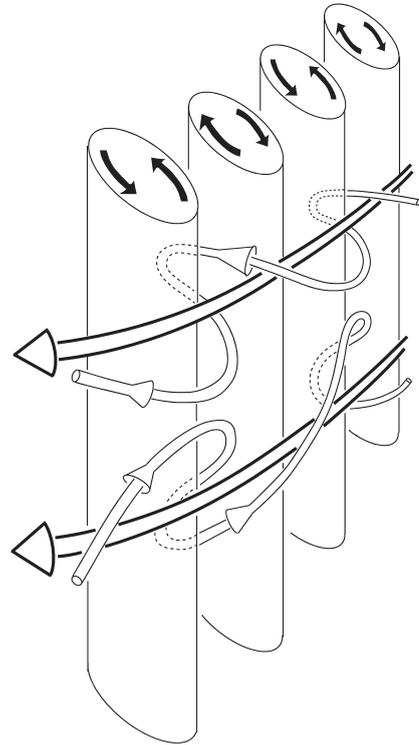


図3——地球の双極子磁場は外核中にリング状の電流が流れることで生じている。そのリング状電流は円柱状の対流胞が外核中の磁力線をねじりながら内側に引き込むことで生まれる。

ミュレーションにもとづいてその一つの説明⁽¹⁾を得ている(図3およびコラム参照)。

双極子磁場の自発的生成に加えて、さらに不思議なことがある。外核中を流れているリング状電流は、今は西向きに流れているが、約78万年前には逆に東向きに流れていた。どうしてそのようなことがわかるかと言えば、玄武岩などの岩石に過去の地球磁場が残留磁化として記録されている

双極子磁場生成のメカニズム

外核中の対流運動は、図2や図3に示したように自転軸方向にまっすぐのびた円柱状の対流胞(対流柱)の集まりとして組織化されている。図3の円柱上部に黒い矢印で示したように、地球と同じ方向に回転する対流胞(低気圧柱)と逆方向に回転する対流胞(高気圧柱)という2種類の対流柱が交互に並んでいる。低気圧柱と高気圧柱の間には内向きの強い流れがある。この流れのために外核中の磁力線は内側に引き込まれ、引き延ばされる。これは液体金属中の磁力線が(完全流体中の渦と同様に)流れに乗って運ばれるという性質がある

からである。磁力線にはゴムひもと同様に張力があるので、流れが磁力線を引き延ばすとき、流れの運動エネルギーが磁場のエネルギーに変換される。図には示さなかったが、対流柱の中の流体は実は螺旋状に流れているので、内部に引き込まれる磁力線も螺旋型にねじられる。南半球と北半球では流れの螺旋がちょうど反対(鏡像関係)なので、ねじられる磁力線の螺旋も鏡像関係となる。その結果電流は南北両半球で同じ向きに流れる。このようにして生じたリング状電流が全体として地球の双極子磁場を生む。詳しくは文献(1)を参照していただきたい。

からである。逆向きの磁化をもつ岩石を発見したのはフランス人の Brunhes と日本人の松山基範である。松山の高潔な人格を伝える伝記が最近出版された⁽²⁾。地磁気は過去何度も逆転してきたことがさまざまな証拠から間違いないものとされている。最近 200 万年に限っても少なくとも 7 回、逆転が起きている。この逆転は周期的ではない。記録をみる限り不規則な現象のようである。外核中を流れる数十億アンペアもの円環状電流が突然向きを変えるわけだから、これは実にダイナミックな現象である。地磁気の起源と逆転に関する大変わかりやすい解説書として文献(3)がある。

地球物理としての地磁気ダイナモの中心課題は、(1)なぜ双極子磁場になるのか(つまりなぜ円環状に電流が流れるのか)? と、(2)なぜそれが非周期的に逆転するのか? という二つの疑問に回答を与えることである。

地球の外核を直接探査することができれば一番いいのだが、それは不可能である。一方、地球ダイナモの検証実験はそれほど難しいことではないように思えるかもしれない。それはこのような実験になるであろう: 外核を模した球あるいは球殻状の容器をつくり、その中に液体金属を入れる。重力を人工的につくることはできないので遠心力を使うことにする。つまりその球殻容器を高速で回転させる。幸いなことに地球ダイナモで重要な役割を果たすと考えられている自転の効果も入れることができるのでこれは一石二鳥である。内部の液体金属にとっては遠心力によって外向きの力がはたらくように感じられるので、地球の外核の場合とは逆に、球殻容器の外側の球面を高温、内側の球面を低温にすれば浮力によって熱対流運動が起きる。その熱対流によって生じた流れが MHD ダイナモ作用によって電流を生みだし、さらにはその電流が円環状に流れれば地球ダイナモが実験的に再現されたことになる。

しかしながら残念なことにこのような模擬実験を液体金属を用いて実現することは難しく、実際これまで成功した例はない。その最大の理由は液体金属の電気抵抗が大きすぎるため、より正確に

言えば、実験室で実現できる磁気レイノルズ数が低すぎるためである。(磁気レイノルズ数は装置サイズに比例し、電気抵抗に反比例する。) 実験装置内部で MHD ダイナモ作用が働いて電流が発生しようとしたとしても、電気抵抗が高すぎればそれはすぐに消し去られてしまう。地球ダイナモに関しては直接探査も実験も難しいので、現在のところ計算機シミュレーションが中心的な研究手段となっている。

地球ダイナモの計算機シミュレーションはある意味で非常に簡単である。上に述べた仮想的な実験と同じように、回転する球殻領域の中に電気伝導性流体を入れて重力と温度差をかける。(幸い計算機では重力をシミュレートするのは簡単である。) あとは基本方程式として確立されている MHD 方程式の時間発展を数値的に解いていけばよい。すると中の流体が熱対流運動をおこし、MHD ダイナモ機構が働いて自然に電流が発生し、磁場ができるはずである。このような地球ダイナモシミュレーション研究は 1990 年代の半ばから始まった。「フルモデルの時代に入った地球ダイナモ」という記事が本誌に掲載されたのは 1996 年である⁽⁴⁾。その後の 10 年でダイナモシミュレーションは大きな進歩があった。双極子磁場の生成とその逆転という地磁気の特徴的な性質が計算機の中で再現できたのである。最近の地球ダイナモシミュレーションの発展についてまとめた優れたレビュー論文として文献(5)がある。

だが喜んでばかりもいられない。実は地球ダイナモシミュレーション研究は現在ある意味で奇妙な状況にある。これまでに複数のグループがダイナモシミュレーションによって双極子磁場の生成とその逆転を再現してきたが、それはどれも現実の外核の物性値をそのまま使って計算したわけではない。ここでとくに問題となるのは外核の粘性率である。外核の液体鉄の動粘性率は水と同程度だと考えられている。つまり外核はさらさらの液体である。地球の外核ほど大きな容器内の流体現象をそのまま計算機の中で数値的に再現させることは現在のスーパーコンピュータをもってしても

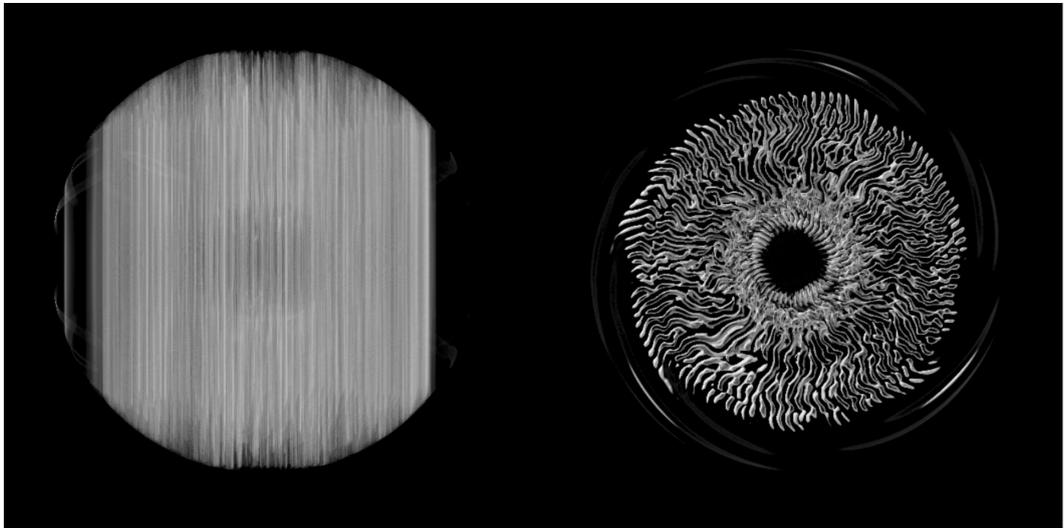


図4——地球シミュレータを使った最新のシミュレーションによって得られた外核の対流構造。赤道面から眺めた図(左)と北極から見た図(右)。南北方向に細かい線が見える。これは地球の自転によるコリオリ力の影響で南北方向に流れ構造がそろっているためである。以前のシミュレーション結果(図2)と比較すると、非常に細かい構造まで再現できるようになったことがわかる。

できない。そこで地球ダイナモシミュレーション研究者は、現実の外核の粘性率の値をそのまま使うことはあきらめて、ある意味で外核の液体鉄が現実よりも粘性率の高い流体だと想定したMHDダイナモの計算を行ってきた。このような計算によっても双極子磁場の生成やその逆転などの地球ダイナモに特徴的な性質が再現できたわけであるが、考えてみればこれは不思議なことである。パラメータがまったく違うにもかかわらず定性的に同じ結果が出たということは何を意味するのであろうか？ ここにはおそらく何か深い理由があるに違いない。それを探ることは今後のダイナモ研究の重要なテーマとなるであろう。

* *

地球ダイナモシミュレーションのいわば勃興期が一段落した感のある現在は、今後の研究の方向性を考えるよい機会であろう。私は今後、液体金属を使った基礎実験がますます重要性を増すと考える。実験室で対流によるダイナモ(つまり磁場の自発的生成)を実現することは難しいであろうが、回転系における液体金属の磁気流体力学にはさまざまな課題が残されている。そのような基礎的問題を計算機シミュレーション研究者と実験研究者が協調して追究することが最終的には地球磁

場の理解への早道だと信じる。もう一つ重要な方向性は惑星ダイナモである。

太陽系には地球以外にも、磁場をもった惑星がたくさんある。これらは一つ一つが自然界の用意した壮大なダイナモ実験装置だと言える。当然ながらこれを活用しない手はない。最後に地球ダイナモのシミュレーション研究者が取り組むべき重要課題として挙げておきたいのは、新しいシミュレーション手法の開発である。過去10年間、地球ダイナモシミュレーション研究において用いられた計算手法やプログラムは本質的にはずっと変わっていない。今後ますます大規模になっていくと予想される並列計算機の利用を前提とした新しい計算手法、解析手法そして可視化手法の開発に取り組むことが大事であると私は考える。その一つの試みとしてわれわれは「インヤン格子」という新しい計算格子を提案し⁽⁶⁾、これを用いたダイナモシミュレーションを現在行っているところである(図4)。この計算は日本が世界に誇るスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を駆使した大規模なものである。今後、実験、観測、シミュレーションの三者がうまく協調することで地球ダイナモの研究がさらに発展することを心から願っている。

謝辞 原稿を読んで有益なコメントをいただいた吉田茂生博士(名古屋大学)と隅田育郎博士(金沢大学)に感謝いたします。

文献

- (1) A. Kageyama & T. Sato: *Phys. Rev. E*, **55**, 4617 (1997)
- (2) 前中一晃: 日も行く末ぞ久しき, 文芸社(2006)
- (3) 綱川秀夫: 地磁気逆転 X 年, 岩波ジュニア新書 (2002)
- (4) 河野長: *科学*, **66**, 817(1996)
- (5) M. Kono & P. H. Robert: *Rev. Geophys.*, **40**, doi: 10.1029/2000RG000102 (2002)
- (6) A. Kageyama & T. Sato: *Geochem. Geophys. Geosyst.*, doi: 10.1029/2004GC000734 (2004)