地磁気の逆転と気候変動

浜 野 洋 三*

Geomagnetic Reversals and Climatic Change

Yozo HAMANO*

I. はじめに

地球磁場の主要な部分は地球の中心部にあるコア(核)で生成されている。この地球磁場は現在の我々の生活にとってはそれほど深い関わりはなく、磁気コンパスによって方向を知る程度である。しかし、季節によって移動する動物にとっては、この方向を知る手段としての磁場はその生存にとって重要である。地表にある大気の活動は主に太陽エネルギーによって維持されているので、地球の自転軸との相対的な位置、つまり緯度によって太陽から受け取るエネルギー量に違いを生じ、それによって気候が異なる。この気候の異なった場所に移動する場合に磁場がその指標となるのは偶然ではなく、実は地球磁場の成因と密接な関係を持っている。地球のコアは金属鉄を主成分とし、液体である外核と固体の内核に分けられる。磁場はこの外核で作られているが、外核の粘性は小さく、磁場を作る運動には地球が自転していることによるコリオリ力が大きな影響をあたえている。

地球磁場は時間的に一定なものではなく、様々な時間スケールで変動する。地表で観測する自然の磁場変動は時間スケールにして1ミリ秒から1億年以上にも及んでいる。これらの変動のうちで数年より短い周期の変動は、地球の高層大気の電離層や磁気圏を起源とする変動が卓越するが、数年より長い周期の変動は主にコア起源の変動である。これらの長期の変動のうちで最も振幅が大きく顕著なのは地磁気の逆転である。現在の地球磁

場は地球中心においた棒磁石(双極子とよぶ)で良く近似される。双極子の向きはほぼ地球の自転軸に平行であり、N極が南、S極が北を向いている。この双極子によって作られる磁場は、各場所での磁気コンパスのN極の指す方向をつないだ磁力線で表わされる。磁力線は北半球では水平より下向き、南半球では上向きの方向を持っている。地表で磁場を観測していると、日本付近では磁力線の向きは北向きであって、水平面からおおよそ50度下向きである。このような地球磁場は逆転時には全く逆の方向を持つ。また磁場が逆転する際には、磁場の強さが非常に弱くなる。現在の地球磁場は有害な宇宙線が地球外から地表に到達するのを遮断しているの、磁場が弱くなるとこれらの有害な高エネルギーの宇宙線が地表に達して、生物に害を与える可能性がある。

この磁場の逆転が最も最近起こったのは70万年前であるが、最近5百万年間では20万年に1回程度の頻度で逆転を繰り返している。逆転頻度から考えると現在いつ逆転が起こっても不思議ではない。19世紀の半ば以後、現在までの磁場強度は100年間に5%の割合で減少している。このままではおおよそ2,000年程度で強度は0になり、逆転するとも考えられる。磁場変動は古地磁気学によって昔の磁場の情報が得られ、それによって逆転の歴史も分かってきたのであるが、今後の逆転の予測をするためには、今まで述べてきたような確率的な議論だけでなく、地磁気の逆転のメカニズムを明らかにすることが必要である。

最近の堆積物コアによる古地磁気測定や地球環境に関わる測定から、気候変動と磁場の間に相関があり、地磁気の逆転の頻度についても気候変動

* 東京大学理学部地球惑星物理学教室

* Department of Earth and Planetary Physics,
University of Tokyo

と関係があると考えられる証拠が得られてきた。本稿では地磁気の逆転に関する事実と磁場変動と気候変動の関わりを述べ、コアでの磁場の生成に地球の自転が重要な影響を与えていることから、気候変動が磁場変動に影響を与えるメカニズムを提出する。そして、このような関係から地磁気の逆転についての予測の可能性を考えよう。

II. 地球磁場の逆転

観測装置による地球磁場の精密な観測は16世紀以降のことである。これらの観測は航海のための方向を知る手段として行なわれたもので、初期の頃には磁場の方向を現わす偏角（磁場が水平面内で地理的な北となす角度）の測定が主であり、その後伏角（磁場が水平面となす角度）の測定が行なわれるようになった。磁場強度の観測は1840年以後の150年程度しか行なわれていない。このような磁場について、より昔のことが分かるのは古地磁気学のおかげである。地球上のほとんどの岩石には鉄の酸化物である磁性鉱物が含まれ、これらの磁性鉱物はそれぞれの粒子が磁石になっている。溶岩が固まってできた火山岩は、岩石のなかでもこれらの磁性鉱物を最も多く含む。溶融した溶岩が固結して冷却していくときに、岩石中の磁性鉱物の持つ磁化は地球磁場との相互作用のために、その時の地球磁場の方向に向き、やがて冷却が進むにつれて動けなくなる。このため火山岩全体が弱い磁石となり、その全体の磁化は岩石が固化して冷却したときの地球磁場の方向を向く。この残留磁化は非常に安定であって、岩石が固結したあとに周囲の磁場が変化しても、もとの磁化を保存する。このために過去の岩石を採集してその生成年代と磁化を測定すれば過去の磁場が再現される。堆積岩や堆積物の場合もメカニズムは少し異なるが、やはり堆積に伴って磁性粒子の磁化が地球磁場の方向に固定され、これらの岩石が堆積した頃の磁場を保存する。また、人工的な遺跡のかまどなども最後に熱せられたときの磁場を保存する。このような岩石の測定から過去の磁場が分かり、35億年程度前にも既に地球に磁場が存在したことが分かっている。

古地磁気学によって過去の磁場が調べられるに連れて、地球磁場が様々な時間スケールで変動することが分かってきた。磁場はその方向も強さも変動する。変動の振幅は周期によって違うが、最も振幅の大きな変動は地磁気の逆転である。地磁気の逆転は最近70万年間は起こっておらず、逆転に要する時間も数千年よりは長いので、直接の観測によっては調べることができず、古地磁気学の研究によって初めて明らかになったものである。最初に現在の磁場の方向と全く逆向きに帯磁した岩石が発見された時には、その岩石が生まれた頃に地球の磁場が逆転していたとは信じられず、2次的な作用によって岩石の磁化が逆転したと考えられた。また榛名山の凝灰岩のように冷却する途中に磁化が逆転する岩石も見つかった。しかし、同じ生成年代を持つ岩石が同じように逆転した磁化方向を持ち、それが岩石の種類によらないことから、やがて過去の磁場が逆転していた時期があったことが確かめられた。その後の特に放射性同位体を用いた年代測定の方法が進歩することによって岩石の年代が精度よく決められるようになると、過去に地磁気の逆転が何度も起こったことが分かり、逆転の時間スケールが作られるようになった。しかし、年代決定の精度が過去の岩石になるほど悪くなるために、陸上の岩石から求められた逆転の歴史は精々500万年程度の期間であり、それ以前の時期については逆転の歴史を正確に作り上げることはできなかった。

1960年代の終わり頃にはプレートテクトニクスの進展と関係して、海底の地殻岩石が海嶺で作られる際に、その時の地球磁場方向に帯磁し、海面での地磁気異常の縞模様として観測されることが明らかとなった。この関係からは海洋底の拡大速度が決定され、ほとんどの海底の生成年代が分かったが、同時に地磁気異常と磁場逆転が結びつけられることにより、およそ2億年間の地磁気逆転の歴史が一挙に明らかになった。初期に求められた地磁気の逆転史は海洋底の拡大速度が時間的にほぼ一定であるという仮定に依存していたが、その後堆積岩や堆積物についても独立に逆転史が得られるようになり、最終的には精度のよい逆転の

図 1 海底地磁気異常の縞模様から明らかになった磁場逆転史
黒い部分が現在と同じ向き、白い部分が逆の向きを向いていた期間を示す

図 2 最近2,000万年間 (20Ma) の磁場の逆転史

時間変化が明らかになった。海底の地磁気異常の縞模様から水平方向に得られる逆転史とおなじ変化が堆積岩で垂直方向に得られることは、地球磁場が逆転したことを確定すると共に、堆積岩の間に挟まれた火山性の岩石から年代測定が行なわれ、年代の絶対精度が向上した。海嶺で生まれた海底はやがて海溝に沈み込むために、2億年より古い海底は現在は存在しない。このためにそれ以前の磁場変動の記録は陸上の岩石を使用せざるを得ず、同じ程度の逆転史を明らかにすることは難しいが、このおよそ2億年間の逆転の歴史は、古地球物理学の情報のなかでも重要な精度の高い情報となっている。

現在精度よくわかっている逆転史の全体を図1に示す。黒い部分が現在とおなじ向き、白い部分が逆の向きの期間を示す。また、逆転の様子をもう少し詳しく見るために、最近の2,000万年間の拡大図を図2に示す。これらの図は地磁気の逆転が周期的に起こるのではなく、非常に時間的に出鱈目に起こることを示しているように見える。この逆転の間隔の分布関数を過去のいくつかの期間

について示したのが図3である。この図上で直線になるのは逆転がポアソン過程によって起こっていることを現わす。図3から明らかなように、逆転間隔の分布は直線でよく近似され、逆転がランダムな現象であって、逆転する確率が過去の履歴によらないポアソン過程であることを現わしている。図3で逆転間隔の分布関数が時間の短い部分で直線から外れているのは、短い逆転期間が観測から見過ごされるためと、逆転が瞬間に起こるわけではなく数1,000年間かかって逆転するためであると考えられる。図1や図2を見ると、黒と白の部分の面積の割合はあまり変わらない。このことは、磁場が現在と同じ向きを持つノーマルの場合と逆の方向のリバースの場合で、それぞれの分布関数をとっても大きな差が見られないことを示唆する。この二つの状態が等価であることは、逆転の起源や磁場の発生を考えるうえで重要である。

つぎにもう少し長期的な地磁気の逆転の様子を見ると、図1から明らかなようにおよそ8,000万年前から1億2,000万年前までの間には逆転がな

図 3 磁場の逆転間隔の分布関数

横軸が100万年単位で測った逆転間隔、縦軸が累積頻度を表わす。年代が現在から2,000万年前(左)、2,000万年前から4,000万年前(中)、4,000万年前から6,000万年前(右)と昔にさかのぼるに従って逆転間隔は長いものが増える。

図 4 1億6,000万年間の磁場逆転頻度の長期変動

横軸は年代、縦軸は各年代での100万年間の逆転回数を示す。

く、磁場は現在と同じ向きをずっと向いていた。この時期は地磁気静穏期よばれている。この時期から現在に向かってはだんだんと逆転の頻度が高くなるように見える。また過去に向かってはやはり昔ほど逆転頻度が高くなっており、逆転間隔は短くなっている。この逆転頻度の変動の性質を明らかにするために、逆転頻度の長期的な時間変化を示したのが図4である。図4では100万年に何回逆転するかを示している。これを見るとおよそ

2億年程度の周期で逆転頻度がゆっくりと変化している。また、もう少し短い数千万年の周期での変動も見られるようである。

地磁気の逆転について分かっていることは、以上のような逆転の時間スケールの情報に加えて、逆転する際の磁場変動の様子についてである。磁場の逆転は前に述べた双極子がほぼ同じ大きさのまま180度ぐりと向きを変えるわけではなく、1方向の双極子の強さが小さくなり、やがて逆方

向の向きに成長する。この逆転に要する時間は数千年から1万年の程度である。この事実はまず、双極子が自転軸の方向を向きたがり、赤道面内の方向が不安定であることを示している。現在、双極子が自転軸方向の成分が大きいことは偶然ではなく、磁場方向が地球の自転に大きく影響されていることを意味する。また、逆転に要する時間（長くて1万年）が逆転間隔（最近ではおよそ20万年）に比べてずっと短いことは、地球のコアが磁場が存在する状態が安定であり、磁場の無い状態が不安定なことを示している。これは磁場の生成過程を考えるうえでは重要な制約条件となる。

磁場の逆転に関連して、もう一つ考慮する必要があるのは、エクスカージョンとよばれる現象である。これは逆転のように全世界で同時に起こるわけではないが、1万年程度の期間、非常に乱れた磁場が観測される現象である。このエクスカージョンは最近の70万年間にも7-8回以上あったと考えられている。これについてはまだエクスカージョンそのものの存在が全面的に認められているわけではないが、磁場の逆転が途中で中断されて元に戻った現象と言う解釈がされている。

III. 気候変動との関わり

磁場変動と気候変動の関わりについては、今までにも数多く指摘されてきたが、明解なメカニズムが提出されなかったために、一般には信じられていない。これらの変動ではまず磁場強度と寒い暖かいの気候変動との関係である。このような変動では特に装置による精密な観測がある最近の100年程度の期間についてと、磁場の変動と含まれる化石や花粉等の気候の指標となるものが同時に測定できる堆積物のデータから数万年程度の期間についての観測がある。最近百年間の磁場強度変化と平均気温の関係では、磁場については世界中の広い範囲の観測データがあるために、磁場を球面調和関数に展開して双極子成分を取り出し、その大きさの変化を気候変動と比較できる。気候変動の指標としてはグローバルな平均温度を用いると、最近の気温の上昇と磁場強度の減少が対応しているように見える。これについては磁場強度

の変動が気候変動に影響を与えると言う方向の関係が議論されたことがあるが、今のところ明確な解釈はなされていない。

堆積物を用いたデータについては、磁場強度についての琵琶湖の堆積物を用いた研究が先駆的なものであり、また海底堆積物を用いた水温と磁場強度の比較も行なわれている。このような変動は1地点で観測される磁場の強度とその地点の気候の指標を比較したものであり、グローバルな変動に地域的な変動を重ね合わせたものを観測しているために、信頼度は劣るかも知れないが、観測結果は磁場変動と気温を表わす指標との間に明らかな相関が見られる。しかしながら、今までの観測結果では変動の様子が磁場強度と気候変動で多少の位相のずれが見られ、そのために気温の上昇と磁場強度の増大を結びつけたり、また逆の関係を推定した議論がある。このような経過に加えて、磁場ではなく堆積物の持つ磁化の強度が、気候によって堆積物中の磁性粒子の量や組成の変化を通して影響を受ける場合もあることから、非常に説得力を持った議論ができなかった。しかし、この関係についてはある程度堆積速度が速く、また磁性鉱物粒子の含有量も同時に測定することによって、確実な関係を明らかにすることは可能である。

このような磁場強度と気候変動の関係に加えて、最近では主に湖底の堆積物や海底堆積物でも比較的堆積速度の速い堆積物を用いることによって、磁場の方向の変動を詳しく調べることが可能になった。これらは乱されない堆積物を採集するピストンコアの長さの制限のために、最近10万年程度の観測が主なものである。このような観測の結果からは気候変動に特徴的な周期である4万年や2万年の変動周期が、磁場の方向変化にも存在することが主張されるようになった。また、火山岩によって最近70万年間には磁場の逆転ではないが、前に述べたエクスカージョンとよばれる磁場の方向が大きく変わる時期が数回以上見つかリ、これらがおおよそ10万年の周期を持って起こることから気候変動との関わりが示唆されている。

このような堆積物の磁場変動について、ここでは国際深海掘削航海によって得られた日本海の堆

図5 国際深海掘削計画により日本海で掘削された堆積物コアから推定される最近80万年間の磁場強度変化（上）と同じ期間の世界中の平均的な酸素同位対比の標準変動曲線（下）

積物のデータを示そう。これは隠岐海嶺の山頂の堆積物であり、水深が1,000mと浅いために、堆積速度がおおよそ1,000年に10m以上と非常に速く、また堆積物中の磁性鉄粒子の濃度を表わす指標としての磁気帯磁率が深さによってほとんど変動しないことから、上に述べたように堆積物の磁化強度の変化が主に磁場強度の変化を表わしていると考えられる。図5ではこの堆積物で推定された磁場強度の変動を示す。また、同じ期間について気候変動の指標として酸素同位体の変化を同時に示す。酸素同位体は大陸氷床として海水から取り去られた量によって変動し、海面変動の様子を表わすと考えられる。海水から蒸発によって取り去られた水が高緯度地方に降り積もって氷床となるため、図では原子量18の酸素の割合が増加するほど、大陸氷床の量が増え海面が低下することを示す。この図から明らかなように、数十万年の時間スケールで見ると、磁場強度の変動は酸素同位体の変動の様子と似てはいるが、卓越周期成分が磁場変動の方が酸素同位体変動に比べてより短

周期であることと、10万年程度の周期の変動については多少の位相のずれがあることが見て取れる。図5を見るとむしろ酸素同位体変化の微係数の変動とより強い相関があるようである。この磁場強度変動の20万年までの周期スペクトルを図6に示す。卓越する周期としては18-19万年、13-14万年、7-8万年、4-5万年付近にスペクトルのピークが見られる。堆積物の深さを時間スケールに直すチェックポイントとしては、今から73万年前の松山期からブリュン期への磁場の逆転時期を用いているだけなので、堆積速度が変動することを考慮するとピークの位置に多少の不確定性はあるが、最近の気候変動で最も卓越する10万年の周期が見られず、その周辺の周期が卓越することは特に興味深い。

次にもう少し時間スケールを広げて、磁場の逆転について気候変動との関わりを考える。磁場の逆転間隔については、図3の分布関数では細かいことが分らないので、この分布関数を微分した確率密度関数をヒストグラムの形で示した図7を見

図 6 存否法によって求められた最近80万年間の磁場強度変化（図5に示す）の周期スペクトル
ARオーダー20から40で求められた波素の振幅をすべて示す。

図 7 図1に示す逆転史の逆転間隔の中で50万年より短い間隔を持つもののヒストグラム
横軸は逆転間隔、縦軸は頻度を表わす。

よう。図7は20万年までの逆転間隔の頻度分布と考えることができる。この図は、逆転間隔にも図6で見られたのと同じように、18万年、14万年、8万年、5万年近傍の時間間隔が卓越していることを示す。最近70万年間の磁場強度の時間変動の卓越周期ともう少し長い期間（4,000万年間）に

起こった磁場の逆転の発生間隔の間に強い相関があることは、これらが同じ原因によって起こっていることを示唆する。このような磁場の変動の原因が気候変動に関係があることを明らかにするのは次の問題である。

最近の気候変動の代表的な周期はミランコビッ

図 8 1 億 6,000 万年の間の海水準の長期変動

チサイクルとして知られる、4 万年、10 万年、40 万年である。ただし、10 万年周期の成分は地球の太陽の周りをまわる軌道要素の変動から計算した日射量の変動には現われず、この周期が最近の数十万年に卓越する原因については、氷床の発達に対する地球内部の変形等による非線形効果が考えられている。上に述べた 5 万年、8 万年、13 万年の周期の変動もやはり、あとで述べるようなミランコビッチ周期に対する非線形効果によって説明可能である。

図 5 に示す長周期の逆転頻度の変動と比較するために、最近 1 億 6,000 万年間の海水準の変動を図 8 に示す。これらの変動の間には顕著な相関が見られる。このような長期の海水準の変動が直接気候変動に伴う海面の上昇と下降を表わしているわけではないが、1 億年程度前の白亜紀中期は特に温暖な気候であり、それ以後現在まではだんだんと寒冷な気候に移り変わったことが知られている。図 5 と図 8 の比較は現象としては気候が緩くなると、磁場の逆転頻度がだんだんと減少することを示している。この相関は長期的な全体変動と、もう少し短い数千万年の周期の時間変動についても成り立っている。これに関しては最近いくつかの解釈がなされているが、そのほとんどはマンテルの活動を通しての説明である。つまり、コア-マンテル境界で発生した大規模なプリュムがマンテル中を上昇すると、コアでは対流運動が活

発化して安定な磁場を作り、白亜紀中期の地磁気静穏期が生じる。一方、マンテル上部では上昇してきたプリュムのために活動が活発化し表層の温度が上がるために海面の上昇をもたらす、同時に活発なマンテルから放出される二酸化炭素のために、この時期の気候が温暖化する、という考え方である。しかし、このような考え方ではプリュムが非常に短い時間にマンテル中を上昇する必要がある、また気候変動と磁場の逆転が直接的には無関係であることになり、先に述べたような両者の結びつきが説明できない。気候変動と磁場の逆転の間に見られる数万年から 1 億年の時間スケールの相関の因果関係を明らかにして、地磁気逆転の予測、あるいは逆に地磁気の変動から気候変動の予測を考えるために、つぎには磁場の生成の原因を簡単に述べる。

IV. 磁場生成のメカニズム

地磁気の逆転を含む変動を予測するためには、地磁気の起源と変動のメカニズムをある程度理解することが必要である。

地球磁場はコア内部の外核を流れる電流によって生成されている。この電流系は液体である外核の流体運動によって維持されている。このメカニズムがダイナモ理論とよばれるものである。磁場中を導体の流体が運動することによって、液体中に起電力が生じて電流が流される。電流が作る磁

場が元からあった磁場を強める成分を持っていると、磁場はこの作用によってだんだんと強まっていく。もちろん外核の電気伝導度は有限であるために、電流が流れるために発生するジュール熱を供給するエネルギーが必要である。またジュール熱として消費されるエネルギー量は電流の二乗で増加するので、このシステムに供給されるエネルギー源が有限であれば、磁場の大きさもある程度以上に大きくなれず、平衡状態の磁場強度が存在する。これが地球のコアで起こっているダイナモ作用のエネルギーについての概要である。

実際にコアで起こっているダイナモ作用を理解するには、エネルギーだけでなく、ダイナモ作用を起こす流体に働く力と運動方程式を考える必要がある。コアの内部で働く力としては地球が自転していることによるコリオリ力、電磁気的なロレンツ力、そして半径方向に働く重力（浮力）が主な力である。流体の粘性による粘性力はマントルでは最も重要な力（運動を妨げる方向に働く）であるが、コアの場合にはコア-マントル境界の近傍の薄い境界層を除いては、ほとんど他の力に比べて無視できる。境界でのコアとマントルに働く力は境界が凸凹なために働く圧力トルク、マントルとコアの電気伝導度の比が有限なために働く電磁気力、そして粘性力が考えられる。このような外核全体と、境界で働く力の釣り合いからコアのダイナモ作用が維持されている。特に、コア内部の運動で重要なのは二つの種類の運動である。一つは対流運動とよべるものであり、温度または組成の違いによって生じる浮力によって駆動される。もう一つの運動は地球の回転方向の流れであって、特にこの回転速度が自転軸からの距離によって変化する仕方、つまり回転速度の半径方向の微係数が磁場を生成するのに重要である。前者の対流運動は半径方向の運動を伴うポロイダルな速度場であり、後者は半径方向の成分を持たないトロイダルな速度場である。

ダイナモ作用をより分かりやすく理解するには、速度場と同様に磁場を半径方向の成分を持つポロイダル磁場と半径方向成分を持たないトロイダル磁場に分けて考えるのが分かりやすい。この時の

磁場の生成や消滅を規定する誘導方程式は以下のようになる。

$$\begin{aligned} s \frac{\partial}{\partial t} (s^{-1} \mathbf{B}) + s \mathbf{V}_P \nabla (s^{-1} \mathbf{B}) &= s \mathbf{B}_P \cdot \nabla \boldsymbol{\omega} + \eta \Delta \mathbf{B}, \\ \mathbf{B}_T &= \mathbf{B} \hat{\phi} \\ s^{-1} \frac{\partial}{\partial t} (s \mathbf{A}) + s^{-1} \mathbf{V}_P \cdot \nabla (s \mathbf{A}) &= \alpha S + \eta \Delta \mathbf{A}, \\ \mathbf{B}_P &= \nabla \times (\mathbf{A} \hat{\phi}) \end{aligned}$$

ここではSは円筒座標の動径方向、 $\mathbf{B}_T$, $\mathbf{B}_P$ はそれぞれトロイダル磁場、ポロイダル磁場を示す。

この式で第1式はトロイダル磁場が右辺第1項の拡散項と第2項の生成項の釣り合いで決まることを示す。この生成項はオメガ効果とよばれ、先ほど述べたトロイダル速度場によって生じている。この項はポロイダル磁場からトロイダル磁場が作られることを表わす。第2式はポロイダル磁場について同様の関係を示すが、この場合はポロイダル速度場によって生じるアルファ項によって、トロイダル磁場からポロイダル磁場が作られる。上記で表わされる関係によって、都合の良い速度場があれば、トロイダル磁場とポロイダル磁場の両方が互いにもう一方の磁場を作り合うことによって成長していくことが示される。この式だけでは磁場の強度は決まらないが、速度場を規定する流体の運動方程式を考えると、そこに入ってくる流体の流体に働く電磁気的なロレンツ力は、磁場が大きくなるほど強くなり、流体に対する抵抗として働く。このために流体に運動を起こさせようとする浮力と、流体運動を押さえようとするロレンツ力の釣り合いから、実際の磁場の強さが決まってくる。

磁場の生成過程において気候変動との関係で特に重要となるのは、ポロイダル磁場からトロイダル磁場を作るオメガ項である。この項が意味することは、外核が全体として剛体運動をしている場合は磁場生成には影響せず、その半径方向の変化が磁場の生成に重要であることである。回転軸からの距離によって流体の回転速度が変化する様子が何から決まってくるかという点、半径方向の流体運動による角運動量の交換と各層の間に働くトルクの釣り合いである。前者には浮力（重力）の分布とコリオリ力が重要であり、後者は電磁气的

な力であるロレンツ力や粘性力が影響するので、結局これらの力の釣り合いで回転速度の分布が決まってくる。また、コアとマントルの相互作用による力が境界付近での角速度の分布に重要な影響を及ぼす。

磁場変動のメカニズムに関して言えば、現在までに逆転を含めたいろいろの周期の磁場の変動について、多くの議論がなされているが、確定的な理論はまだ提出されていない。だが、多くはコア内部の流体運動や電磁場の不安定性に磁場変動の原因を押しつけているものが多く、外部的な作用によって変動が起こされているという考えは少ない。上記のマントル内のスーパープレムに関連した磁場逆転頻度とコアから奪われる熱量との関係も、この内因説の一つに基づいている。このような内因説が考えられている理由は、この変動の時間スケールが表層の大気・海洋を原因とするには長すぎるし、またマントルを起源とするには短すぎるためであろう。磁場逆転の外部起源の要因として隕石の衝突を考えた議論もあるが、そのメカニズムが明らかではない。しかし、磁場変動のところで述べたように気候変動には数万年以上の長い時間スケールの変動があり、これらと磁場変動を関係づけるメカニズムが考えられるとすれば、前章で述べた磁場変動と気候変動の相関はより確定的に説明できる。

V. 気候変動と磁場の変動

磁場変動のところで述べたように、磁場変動と気候変動の間になんらかの相関があることは認められる。このメカニズムとしては上に述べたコア内部の流体運動の性質と磁場生成機構から、地球の自転が緊密に関係していることが明らかである。まず、気候変動と地球回転の関係を考えよう。地球回転についての情報は天体観測による最近のデータと、珊瑚等を使った数億年スケールの速度変動の解析結果が主なデータであり、数万年スケールで磁場変動とは直接比較できない。気候変動と地球の自転速度の関係としては、数年スケールのそれぞれの変動が上層大気とマントルの間での角運動量の交換によって説明できることが確かめら

れている。もう少し長い時間スケールの変動に関しては、例えばおよそ100年間程度の変動については図9に示すように1900年以降の全地球の平均気温と自転速度（1日の長さで表わす）の間に数10年周期の変動について相関があるように見られるが、このメカニズムは分かっていない。通常はこのような時間スケールの自転速度の変動はコアに起源が求められている。

大気、海洋の活動がマントルの自転速度を変えるもう一つのメカニズムは、マントルの慣性モーメントの変化を通してである。この場合はマントル表層の物質の配置が変わることによって慣性モーメントが変化して、それに伴ってマントルの回転速度が変動する。このメカニズムは比較的に長い周期では重要と考えられている。

一方、気候変動に関しては、特に氷期、間氷期サイクルに関わる大陸氷床の量の変化と、それに伴う海水面の変動によってマントルの慣性モーメントを変化させることが考えられる。この変動の大きさの程度は最近の氷期から間氷期に移り変わる状況を見てみると、この移り変わりに伴う海面の上昇は140mに及ぶ。また、この変動に要する時間は数千年以内である。このような変動に対する慣性モーメントの変化の割合は、回転軸方向について 10^{-5} を超え、地球の自転速度は1日の長さにして1秒程度の変化を生じる。この回転速度の変動はコア・マントル境界に達し、コアの運動に影響をあたえる。このマントルの自転の変化によるコア内の流れの速度の変動は、最大で 3×10^{-3} m/s程度となる。一方、コアでの通常の大規模な流体運動の速度は 3×10^{-4} m/sより小さいことが推定されている。マントルによって生じる擾乱の程度はこの速度に比べてずっと大きいので、この回転速度の変動がコアのダイナモ作用に大きな影響をあたえることは明らかである。もちろん、この影響の大きさはコアとマントルのあいだの相互作用の強さに依存するものであり、数万年の変動についてこの相互作用の大きさは十分に分かっているわけでないので、逆転のメカニズムをすぐに明らかにすることはできない。しかし、現在のところ、磁場の非双極子成分の西方移動とよばれる

図 9 1900年から1980年の期間の世界平均気温 (上), 1日の長さの変化 (中), 自転軸方向の双極子の強さ (下) の変動を示す

黒丸は測定値, 実線はスムースされた変動を表わす。

1,000年スケールの変動とそれより短い変動周期の変動については, マントルの回転速度の変動とコア・マントル境界の凸凹を考慮することで, 観測と良く一致する磁場変動のメカニズムが提出されている。逆転に関わるメカニズムについては現在検証中であるが, 今までの観測結果を考慮すると, 数万年の時間スケールではマントルの回転速度のゆらぎが大きいほど, コア中の流体運動が乱されダイナモ作用が不安定となり, これによって磁場は減少すると考えられることである。この現象の大きさがある値を超えると, 磁場が極端に小さく

なって逆転が起こる。マントルが加速した時に逆転が起こりやすいか, 逆に減速した時に逆転が起こるのかは, 今までのデータでははっきり言えないが, 最近の数十万年では大陸氷床は数万年の時間をかけてゆっくりと蓄積し, 数千年の時間スケールで急激に融ける。つまりマントルの回転速度の加速はゆっくりで減速は急激であるという状況が, 特に最近の70万年間に顕著である。一方, この時期には, いわゆるエクスカッションとよばれる双極子磁場が小さくなり磁場方向が乱れる現象は数回見られ, それが酸素同位体比から推定され

るマントルの回転速度の変動の極大に対応しているように見えるが、はっきりした逆転は73万年前以来無い。このことは逆転にはマントルの回転速度の加速が重要であることを示しているのかも知れない。

VI. 地磁気逆転の予測

以上述べてきた様な磁場の逆転に関する性質から、地磁気逆転の予測を考えよう。予測は本来は未来の活動に関するものであるが、過去に向かっては地磁気の逆転史が非常によく分かっていることから、逆に地磁気の逆転から気候変動についての情報が得られる可能性がある。

まず逆転のメカニズムに立ち入らない確率的な予測を考えよう。これは通常の長期予測に対応するものである。現在までの情報からは逆転確率は図7に示すように白亜紀中期からだんだんと大きくなっている。最近の逆転確率は約20万年に1回の頻度である。この逆転の時系列は長期的にはボアソン過程で表わされ、逆転の確率は過去の履歴によらないから、結局言えることは今から1万

年後までの間に逆転が起こる確率は20分の1、5万年後までの期間には4分の1というのが、現在可能な確率予測である。

気候変動との関係を考えてもう少し情報が得られよう。非常に大きな海面変動は現在ほぼ10万年の周期で起こるように見られることと、1万年前に氷期から間氷期への移り変わりがあったので、次の大きな変動、つまり氷期の最盛期を経過して間氷期に移り変わるのは、およそ10万年程度先のこととなろう。これは次の逆転が起こるにしても10万年後ということを示唆している。しかしながら、そうするとおよそ80万年以上の期間にわたって逆転がないことになり、最近の逆転頻度に比べて少し異常なことである。この80万年間は気候変動で見ても10万年周期の変動が特に顕著に見られる時期であり、それ以前の時期と違っている。またおよそ10万年に1回程度の頻度でエクスカッションが起こっているらしい。この気候変動の様子の違いが最近の逆転が起こらないこととなんらかの関係を持つのかも知れない。