

解説

ダイナモ理論

— 磁場発生と逆転のメカニズム —

佐藤 哲也
(核融合科学研究所)

Dynamo Theory – Generation and Reversal Mechanisms of Magnetic Field

SATO Tetsuya
National Institute for Fusion Science, Toki 509-5292, Japan
(Received 12 October 1998)

Abstract

After its more than 80 years long history, the dynamo problem has finally approached to the goal of one's ambition to unveil its grand mystery of creation and reversal of the geodynamic field in a self-consistent fashion. The success in unveiling this long mystery of the dynamo problem has been brought by elaborate large-scale computer simulations. In this review, a brief history of the dynamo problem, both theoretical and observational, is first described. Then the recent exciting demonstrations of the generation and reversal of the self-excited dipole-like magnetic structure done by the UCLA-LANL group and the NIFS group are described.

Keywords:

dynamo theory, generation and reversal of magnetic field, dynamo simulation

1. ダイナモ理論につながる観測

“ダイナモ”と聞くと一般には“発電”を思い浮かべる。磁場 (B) を横切って導体が動く (v) とき、その両端に起電力 (E) が発する。これがダイナモの基本である。言い換えると、

$$E = -v \times B \quad (1)$$

が基本である。しかし、この場合、磁場 B が最初から存在している。

この解説で論ずるダイナモは地球磁場の発生（地球ダイナモ）や太陽黒点磁場発生のように磁場を発生させるダイナモである。したがって、“磁場有りき”から出発する電気の発生ではなく、“磁場なし”から出発する（と

author's e-mail: sato@toki.theory.nifs.ac.jp

は言ってもごく小さな磁場の種は存在するものとする）磁場の自己励起のメカニズムである。

磁場にはこの解説の主題であるダイナモ説以外にも、原子の種類と配列に基づく磁化された物質（常磁性体）説や温度勾配に基づく熱電効果説なども地球や太陽や宇宙の磁場の起源として考えられうる。しかし、これらの説は現在では完全に消滅している。

1.1 地球磁場と磁石の発見

地球における磁場に関する記述としては紀元前6世紀ギリシャのミレトス市のターレスがマグネタイトの存在を指摘している（[1]、本章の内容はこの本による）。中国においても紀元前3世紀から紀元6世紀にかけての文献の中に磁気を帯びた岩石に関する記述が多く見られる。

磁場の研究にとって最も大きな発見は“磁石”の発見といっても過言ではない。磁石の発見は少なくとも紀元前1世紀にさかのぼり、中国においてなされたとしてある[2]。これにより、地球にはほぼ恒常的な磁場が存在し、その磁気軸が南北にあることなど地磁気のグローバルな姿が浮き彫りにされたと言える。

地球磁場に関する研究は磁石による研究から始まり、1,000年以上の長い歴史を持っている。特に、中国唐代(720年頃)の仏僧であり天文研究者であるYi-Xingによる地磁気傾斜角の観測、その後の経年変化観測、特にギルバード(William Gilbert)による地球磁場が地球固有のものであることの同定(1546年)、1538年から1541年にかけての航海による磁気マップの作成、ハレー(Edmond Halley)による1698年から1700年にかけての科学的研究のための海上観測やフンボルト(Alexander Von Humboldt)のグローバルな磁場強度分布と緯度変化の観測などは特筆に値する。

1.2 古地磁気学と磁場変動

磁石による直接観測に加え、19世紀半ばにはDelesseやMelloniによってある種の岩石が地球磁場の方向に磁化されることが見出され、過去の地球磁場の変遷を知ることができるという極めて重要な手掛かりを得ることができ、地球磁場成因の研究の幕が開かれることとなった。

この古地磁気学の発展によって、地球磁場の方向が100万年の時間スケールで過去に逆転していたことがあることが見出された(松山, 1929; Mercanton, 1926)。この逆転磁場の存在のほかに1万年オーダーで磁場が経年変動することも見出されている(Chevalier, 1925; Thellier & Thellier, 1951, 1952)。

岩石の残留磁気による過去の地磁気の発生史を学問ならしめる重要な決め手の一つに岩石の年代決定がある。これには放射性元素の崩壊が用いられる。特に自然界に豊富に存在するカリウム(K)の同位体 ^{40}K を用いることが多い。約12.5億年を半減期とするカリウム同位体 ^{40}K とアルゴン同位体 ^{40}Ar を検出する方法で年代決定を行うカリウム-アルゴン(K-Ar)法は100万年以上の比較的若いものから数十億年という古いものにまで用いることができる[3]。

1.3 磁場の逆転とマントル対流

地球磁場の形成のメカニズムを解明する上で欠かすことのできないもう一つの重要な準備研究として磁場の逆転とマントル対流の関係を述べておく必要がある。

先に述べたように、岩石の残留磁気測定と岩石のK-Ar年代測定により100万年のオーダーで逆転するもの

(magnetic polarity epochs)に加えて、10万年オーダーで逆転する逆転現象(event)があることがCox等によって示された(1963)。

この大陸上での岩石のサンプルの残留磁気から逆転の歴史を調べる研究が進む中、太平洋や大西洋など大洋海面の磁場の観測によって中央海嶺から南北に延びた縞状の模様が交互に東西に広がっていることが発見された(Mason & Raff, 1961)。VineとMathews(1963)およびMorleyとLarchelle(1964)はこれを次のように説明した。

すなわち、マントル対流の湧口(上昇流)が中央海嶺を造り、海面に高温の海底物質が現れたところで海水によってキュリー点以下に冷やされ、その当時の地球磁場の情報が凍結され、海嶺から東西にマントル対流に乗って広がっていくためであると考えた。したがって、南北に延びた縞状の磁気異状(正状と逆転)は当時の磁場の極性を表していることを意味することになる。マントル対流の東西方向の速さは約2 cm/年であり、太平洋および大西洋の海底の東西の長さを約4,000キロメートルとすると約2億年間の逆転の歴史を教えてくれることになる。岩石残留磁気による逆転の歴史と海底表面の磁気の逆転の歴史が一致することも証明されており、地球物理学にとっては画期的な発展といえる。Fig. 1に1.6億年間の逆転の年代記を示しておく。

このことは逆にマントル対流の存在、さらには地震のメカニズムにも新しい時代を画することとなった。

2. ダイナモ理論への準備

2.1 地球深層部の構造[3]

地球内部深くの情報を知る最上の方法は地震波データである。地震波の観測・測定によって地球内部の弾性的性質や密度情報を得ることができる。これにより、物理的および化学組成についてある程度知ることができる。

これによると地球の内部はシリケート(絶縁体)からなるマントルと鉄でできたコア(中心核)の2層構造からなっている。このコアはまた外核と内核の2つの層からなっている。内核は半径約1,200 kmで固体(導体)である。これに対し、外核は半径約2,900 kmまでで液状導体である(Fig. 2)。

2.2 エネルギー源

磁場を発生させるには当然エネルギー源が必要である。その候補として次のようなものが考えられる。

(1)潮汐摩擦

コアで消費されるエネルギーは 10^{12} Wのオーダーであ

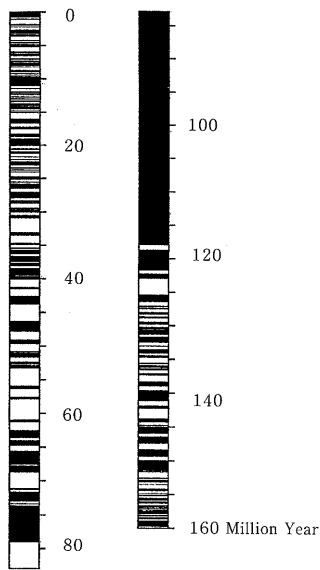


Fig. 1 History of reversal of geomagnetic field.

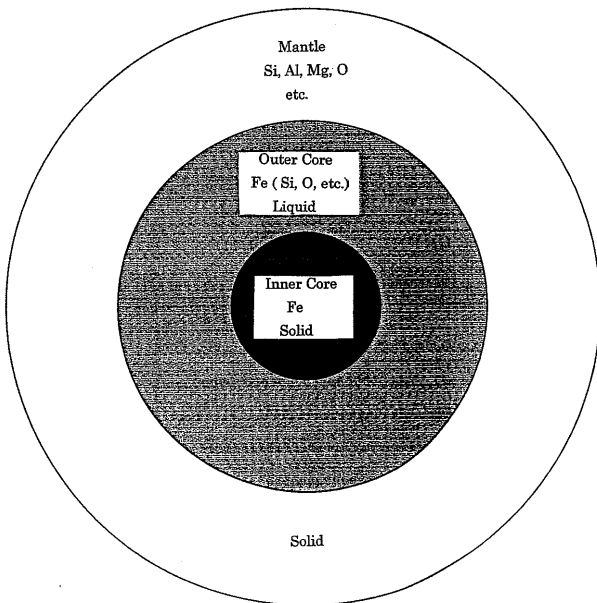


Fig. 2 Structure of the earth's interior (the grey zone is the dynamo region).

る。

(2)熱対流

コア-マントル境界から放出される熱流は 4×10^{12} W 程度と考えられているのに対し、熱源は $10^{11} \sim 10^{12}$ W と考えられており、少し足りないと考えられているが、ダイナモ理論にとっては最も好ましいものである。同位元素の放射性崩壊の量が現在考えられているよりも

多い可能性もあり、否定できない。

(3)成分変化に伴う浮力

内核境界近くで結晶化する際の潜熱、あるいは結晶化時に鉄よりも軽い元素を放出し、その軽い元素が上昇する対流を作る可能性がある。これが現在最も好まれているエネルギー源と考えられている。

2.3 基礎方程式

(1)磁気誘導方程式

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = D \nabla^2 \mathbf{B} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

ここに D は拡散係数で $(\sigma \mu_0)^{-1}$ で与えられる。

σ は電気伝導率で、 μ_0 は透磁率。

(2) Navier-Stokes 方程式

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \rho \nabla \phi - 2\rho (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}) - \nu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (3)$$

ここに ϕ は重力ポテンシャルで、 $\boldsymbol{\Omega}$ は回転の角速度。

ν は粘性係数、右辺第3項は重力項である。

(3)連続の式

$$\frac{\rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \quad (4)$$

(4)熱伝導方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T - \mathbf{v} \cdot \nabla T + \varepsilon \quad (5)$$

ここに κ は熱伝導率で、 ε は熱源。

2.4 基本無次元化パラメータ

(3)式には基本的には5つの力が入っている。コリオリ力を基準に他の力との大きさを無次元量で表してみると、

$$\begin{aligned} \text{Ekman 数} &= \frac{\text{粘性力}}{\text{コリオリ力}} \\ &= (\text{Taylor 数})^{-1/2} \sim 1.3 \times 10^{-15} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{Rayleigh 数} = \frac{\text{浮力}}{\text{コリオリ力}} \sim 2 \times 10^{15} \quad (7)$$

$$\text{Elsasser 数} = \frac{\text{ローレンツ力}}{\text{コリオリ力}} \quad (8)$$

を定義することができる。

また、圧力に関しては(5)式における熱源 ε をエネルギーとして熱伝導によって温度の勾配が生じ、(3)式を通して対流が発生し、その後は対流により非線形的に

(5)式を通して熱分布が変わり、それを通して非線形的に熱対流に、またコリオリ力によっても対流自身に、そして同時に(2)式と非線形的に結合して磁場へと複雑なフィードバック結合が進展していく。したがって、圧力とコリオリ力の比は

$$\text{Rossby 数} = \frac{\text{回転周期}}{\text{拡散時間}} \sim 10^{-8} \quad (9)$$

$$\text{Roberts 数} = \frac{\text{熱伝導率}}{\text{拡散係数}} \quad (10)$$

などのパラメータに関係してくる。

また地磁気ダイナモにおいては一般に(3)式の重力項はブシネスク近似を用いて浮力項で近似し、非圧縮性を仮定する。したがって、(4)式は用いず($\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$), (3)式で ρ は一定(ρ_0)とする。

2.5 ダイナモ理論の基礎的な性質

2.5.1 Cowling 定理

1934年に Cowling は“回転軸に対称な磁場構造は対称な対流構造によっては維持されない”ことを示した。このことはダイナモ作用が起きるためには対称性を破るコリオリ力の存在が必要となることを示唆している。

2.5.2 Taylor 条件

(3)式において慣性項と粘性項が無視できる場合、圧力、ローレンツ力、浮力およびコリオリ力の4つの力の釣り合いとなる。この時、回転軸に平行な円筒を考える、円筒面 S 上の積分に対して

$$\int_S [\mathbf{J} \times \mathbf{B}]_\phi dS = 0 \quad (11)$$

を証明することができる。

この式の意味することは、回転軸に平行な円筒面上ではローレンツ力は消滅することである。これを磁気地衡流(magnetostrophic balance)という。

2.5.3 Taylor-Proudman 定理

Busse は弱磁場ダイナモモデルとして、ローレンツ力と浮力を無視できるコリオリ力と圧力が釣り合う地衡流を考えた。この場合、対流は回転軸に無関係となることが証明される。これを Taylor-Proudman 定理という。この地衡流は Fig. 3 のような構造となる。

この弱磁場モデルでは Elsasser 数は1以下であり、ダイナモ理論としては不完全と思われる。したがって、Elsasser 数は1より大きくなると考えられる(強磁場ダイナモモデル)。この強磁場モデルではローレンツ力が速度(対流)場に大きな影響を及ぼす。

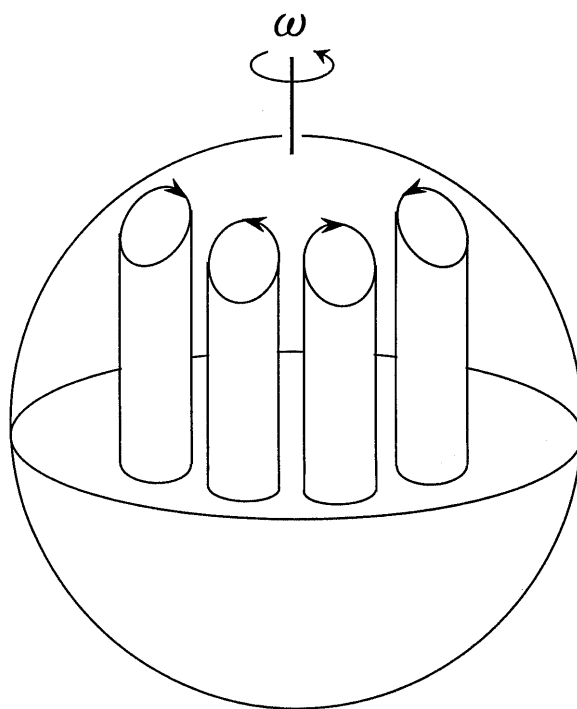


Fig. 3 Taylor-Proudman flow.

3. ダイナモのモデル研究

3.1 円盤ダイナモ

磁場が正帰還される機械モデル、ダイナモの円盤おもちゃが、Larmor によって1919年に考案された(Fig. 4 (a)). 力武はこの単一円盤モデルを Fig. 4 (b) に示すような双円盤モデルにすることによって逆転をも許すモデルに改良した。このモデルは本来三次元空間での複雑なからくりによって発生すると考えられる地球磁場の発生を0次元で説明しようとするもので、エッセンスが含まれていることはいるが、単なるおもちゃであることには間違いない。

3.2 α -ダイナモ

ダイナモ項 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ において、速度と磁場の摂動項の相関が元の磁場を強めると仮定するのが α -ダイナモの基礎である。すなわち、 $\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \delta\mathbf{v}$, $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \delta\mathbf{B}$ と置き、その平均をとるとき

$$\langle \delta\mathbf{v} \times \delta\mathbf{B} \rangle = \alpha \mathbf{B}_0 \quad (12)$$

となり、磁場の方向に起電力を生じることになる。適当な配位のもとでこの起電力がもとの磁場を増すことになれば磁場の増大につながるというのが α -ダイナモの原理である。

この考え方も何とか数学的手法でダイナモを解きたい

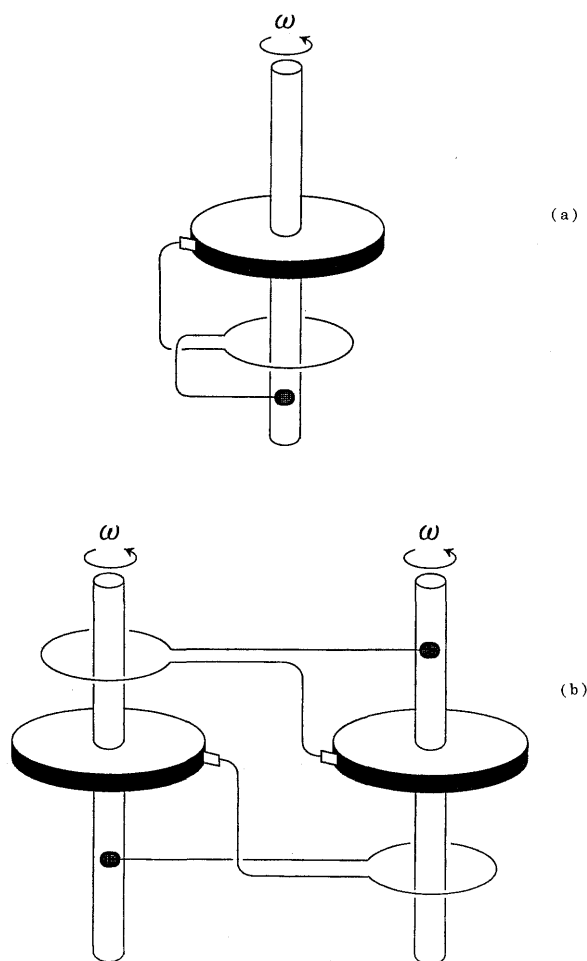


Fig. 4 Disk dynamo model: (a) single-disk model and (b) double-disk model.

というダイナモ研究者のせつない願いから考え出されたものであり、ダイナモ項 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ が磁場発生の要であることは間違いないが、この α -ダイナモによるきちっとした地球磁場発生を説明するメカニズムが見出されたわけではない。統計力学における常道である統計平均手法を用いて $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ という非線形項を何とか数学的に取り扱おうというものである。したがって、私自身は α -ダイナモ説も高級なダイナモおもちゃの一つであると考えている。ただここで誤解しないしてほしいのは、 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ の非線形項が磁場発生の要でないといっているのではない。初めに述べたとおりダイナモは $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 項こそその要である。

3.3 ω -ダイナモ

Parker は1955年にポロイダル磁場とトロイダル磁場がお互いに変換するトポロジーについてのモデルを提唱している。

まずトロイダル磁場からポロイダル磁場が発生するた

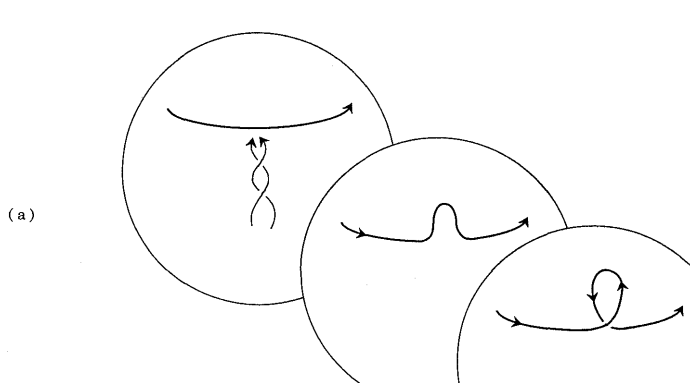


Fig. 5 Parker's ω -dynamo model: Poloidal field is transformed from toroidal field under the influence of upwelling spiral flow generated by a convection instability.

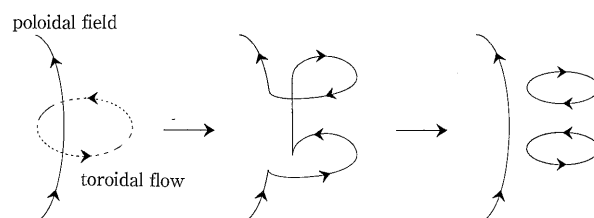


Fig. 6 Parker's ω -dynamo model: Toroidal field is transformed from poloidal field under the influence of toroidal flow.

めのポンチ絵的説明として、地軸を取り囲むトロイダル磁場が例えば北半球にあったとする。外核領域で下方から上方に向かう対流が存在するとコリオリ力によって反時計回りの捻れを受ける。したがって湧き上がったトロイダル磁場は Fig. 5 に見られるようにポロイダル磁場を生成することができる。また、ポロイダル磁場はトロイダル対流によって Fig. 6 に示すようなポロイダル磁場を生成することができる。このようにポロイダル磁場とトロイダル磁場がトロイダル流と上昇（下降）流との相互作用でお互いに変換できるという Parker のモデルを ω -ダイナモと呼んでいる。当然実際に磁場が発生するためには、これらの磁場の種と対流とが正帰還となる関係を満たさなければならない。これによって初めてダイナモが完成する。

3.4 キネマティックダイナモ

熱源から対流が発生し、その対流から磁場が増大することを示す試みが Larmor 以来80年近く（厳密にはダイナモ現象は Cowling, Elsasser, Bullard, Parker により始められたので60年の歴史といえる）研究が解析的に行われてきたが、ごく最近のシミュレーション研究の成功ま

で自己無頓着な理論はむずかしくて解明できない状態であった。

この自己無頓着なダイナモ理論を断念し、速度場 V の形は与えられたものと仮定して、磁場が自己励起する条件を求めるのがキネマティックダイナモである。この場合、磁場の誘導方程式は

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + D \nabla^2 \mathbf{B} \quad (13)$$

となる。

太陽磁場の発生を研究する場合には太陽表面に水素対流泡がすでに大きく発達していると仮定できることから、比較的キネマティックダイナモモデルがよく研究されている。

(13)式は磁場に関する線形方程式であるが、これを解く方法として1954年に考案されたBullard-Gellmanモデルは速度場と磁場をポロイダルおよびトロイダルベクトルで展開し、その線形固有値問題として不安定解を求めようとするものである。しかしながら、線形問題としても回転球殻という事情から無限シリーズを取り入れても収束できないことが示されている。このことはダイナモ機構が本質的に難解な問題であることを物語っていると言える。

4. ダイナモ理論の完成—大規模シミュレーション研究の時代

これまで述べてきたように地球磁場の発生メカニズムを解くことはアインシュタインをして、特殊相対論の論文執筆の直後に(1905)、“物理学における最も重要かつ未解決問題の一つである”と言わせた問題であり、それだけむずかしい問題であることを如実に示している発言といえる[1]。

前章で記述したダイナモのモデルの中で最も物理的に問題の核心にせまっているのとしてParkerの物理的モデルとしての ω -ダイナモ効果をあげることができる。

18世紀のデカルトやニュートン以来現在まで物理学の主要研究手段として輝かしい発展をもたらしてきた数学に依拠する理論研究の限界を端的に示したのがこの地球ダイナモ問題であると言える。

ところが、ごく最近になりこのダイナモ問題に決着をつける研究がほぼ同時に独立に2つのグループでなされた[4]。一つは米国のダイナモ研究者の第一人者であるPaul Robertsのグループであり、もう一つは我が国における核融合科学研究所のグループである。これは従来

の解析的方法ではなく計算機シミュレーションによってなされたものである。

4.1 ダイナモシミュレーションモデル

ダイナモシミュレーションは本質的にはプラズマ研究におけるMHDシミュレーションであり、前述の方程式(2)–(5)を解くことになる。モデルは現実の地球と同様、Fig. 2に示す内核とマントルで囲まれた外核が解かれる対象となる。この領域は地球の奥深くにあり、直接状況を観測することができず熱源にも物理的・化学的状況にしてもまだまだ不明なところが多く、シミュレーションモデルの採用に当たって多くの不確定要素が残っている。例えば

1. ダイナモを起こす直接のエネルギー源(熱源)は何か
2. 内核と外核、および外核とマントルの境界条件は何か
3. たくさんある無次元化パラメータをどのように設定すればよいのか
4. どのようなアルゴリズムを採用するのが賢明か等々がある。

熱源に関してはすでに2.2節で記述したとおり、まだはっきりしていないが、基本的には熱対流を引き起こすものであり、内核—外核境界(球)面に高い一定の温度を与えるなり、熱流束を与え、外核—マントル境界(球)面を低い温度に固定するなりすればよいであろう。

無次元化パラメータをどのように設定するかに関しては、現実に近いものを与えることは2.4節で述べたとおり、少なくとも重要と思われる力の種類が5つあり、それらの相対比が大きく桁が違っており、時間スケール・空間スケールにも桁の違う種々なモードが時と場所によって異なって現れると考えられる。

ダイナモ問題が解析理論で手に負えなかった原因は正にこの桁の違う様々な物理量、時空スケールモードがどれも時と場所によってその働きを発揮するところにある。複雑現象の典型である。

たとえ、現実のパラメータとかけ離れていてもパラメータ間に適当な開きを与えることによって本質を抽出できるという信念によってシミュレーションを実行していく以外に方法はない。信念と書いたのは、当てずっぽうではなく、物理的洞察力に基づく直感を働かせることを意味している。

シミュレーションモデルとして、地球ダイナモ研究の専門家達は、温度勾配と重力項から発生する浮力を導き出すブシネスク近似を採用する。これに対し、陰山—佐

藤モデルでは、コードのより一般性を保つため圧縮性も入るようにしているが、理想気体 ($P = \rho T$) を仮定する。したがって、音波という桁はずれに速い時間スケールでシミュレーションを行うため、地球物理的には不利な条件を課せられることになる。しかしながら、これはパラメータの取り方で克服する。

また、アルゴリズムとしては地球ダイナモ研究者は球殻であるということおよび解析理論の時代からの流れとして、トロイダル成分とポロイダル成分にまず分解し、さらに、各成分を球面調和関数で展開する方法をとる。これはもっともな選択である。このアルゴリズムの一つの利点は差分誤差（特に ∇^2 ）が出ないことである。（もっともモードの切り捨てによる等価的不適切さは出る）。しかしながら、モード結合の取り扱いには膨大な回数の演算が必要となり、現在の最高速のスーパーコンピュータでも到底不可能に近い。Glatzmaier-Roberts は非線形項の計算には一度実空間量に変換して実行し、再びモード展開するという方法で演算量を経済化している[5]。

一方、陰山-佐藤モデルでは、これまでの35年のシミュレーションの経験から現実の問題には実空間で素直に解くことが結局はよい結果を得る近道であるとの経験則にもとづき、実空間（球摩擦）メッシュ法を採用している。この場合、欠点は球の極が形式的特異点になることである。陰山は数学定理を用いてこの特異性を取り除き、しかも極近傍での数値微分精度を上げるためのメッシュ間隔を細くしても演算時間を要しない方法を考案し、擬スペクトル法に負けないアルゴリズムを完成させている[6]。

4.2 ダイナモの振る舞い

ダイナモ問題を完成させるには少なくとも次の現象を証明する必要がある。

- (1) 熱源から熱対流運動が励起され、その結果無限小に近い磁場の種から磁場が大きく励起される。
- (2) 励起された磁場構造として組織化された単純なダイポール構造が生成される。
- (3) ダイポール構造の極性が逆転しうる。
- (4) 逆転はそれまでの比較的定常な状態に比べ、非常に短時間で起きる。
- (5) その逆転、順転は繰り返され、その頻度にはきれいな規則性はなく、間欠的性質をもっている。

地球物理学的にはこれ以外に固有の重要な性質もまだまだたくさんあるが、読者はより物理的立場に興味があると考え、上記の5点にとどめておく。

ここで Glatzmaier-Roberts モデルと陰山-佐藤モデルで得られたいくつかの代表的な視覚的に表した結果を

紹介する。

発生した対流構造の例を Fig. 7 と Fig. 8 に示す。陰山-佐藤モデル（K-S モデルと今後略す）ではよく組織化された6つのサイクロン-反サイクロン対が回転軸に沿って発生しているのに対し、Glatzmaier-Roberts モデル（G-R モデルと略す）では対流形状はかなり崩れている（乱流に近い）。この違いは主に G-R モデルの方が回転速度が速いことによる。これに対し、K-S モデルではよりグローバル層流ダイナモに近い。

次に、発生した磁場構造を Fig. 9 と Fig. 10 に示す。Fig. 7 および Fig. 8 と Fig. 9 および Fig. 10 からわかるとおり G-R モデルでは磁場の発生が内核境界に接したところで発生しているのに対し、K-S モデルではサイクロン-反サイクロン対の中間辺りでの対流の巻き上げ領域での伸長（および圧縮）効果によって発生している。また、詳細は文献[5]に譲るとして、K-S モデルでは磁場発生の物理機構が明らかにされ、Parker の ω -ダイナモ作用に近いことがわかる。Fig. 11 に磁場の生成過程を示す。ここでシミュレーションにより発生した磁場のエネルギーは対流エネルギーの10~1,000倍にも達していることを記しておく。

G-R モデルおよび K-S モデル両者ともダイポール成分の逆転現象も実証している。Fig. 12 および Fig. 13 にその一例を示す。最近の陰山-佐藤モデルのシミュレーションでは、発生した磁場強度が間欠的にフリップ・フロップ状に2つのレベルを遷移するという見事な結果を示している。しかも、この間欠的に起きる強度遷移に対して、ある時にはダイポールが逆転し、それ以外の遷移に際してはオクタポール成分が逆転するという非常に興味ある現象を出している。しかも、このような現象は地球磁場においても観測されている性質であり、今後の研究の進展が楽しみである。

5. おわりに

80年という長い年月をかけての必死の理論研究にもかかわらず解決に至らなかった地球磁場の生成と逆転のメカニズムがスーパーコンピュータの発達という技術の進歩とシミュレーション研究のレベルアップによってここ数年前から解明の兆しが見えてきた。そしてここ数年の間に生成から逆転、さらには磁場強度レベルの急激な変動、物理メカニズムの解明へと急速にダイナモ問題が進展しはじめている。

ダイナモ問題は純粋に磁気流体プラズマの問題であると同時に核融合研究にとっても重要な問題を示唆してい

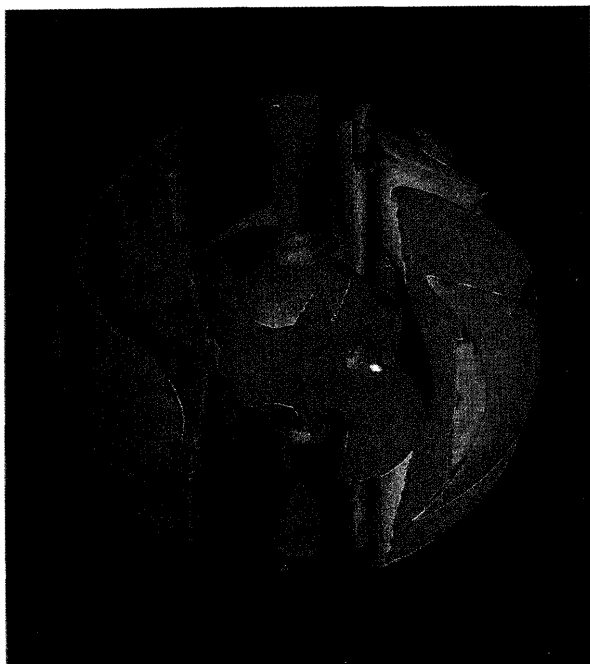


Fig. 7 Irregular convection pattern obtained by the Glatzmaier-Roberts (G-R) simulation model.

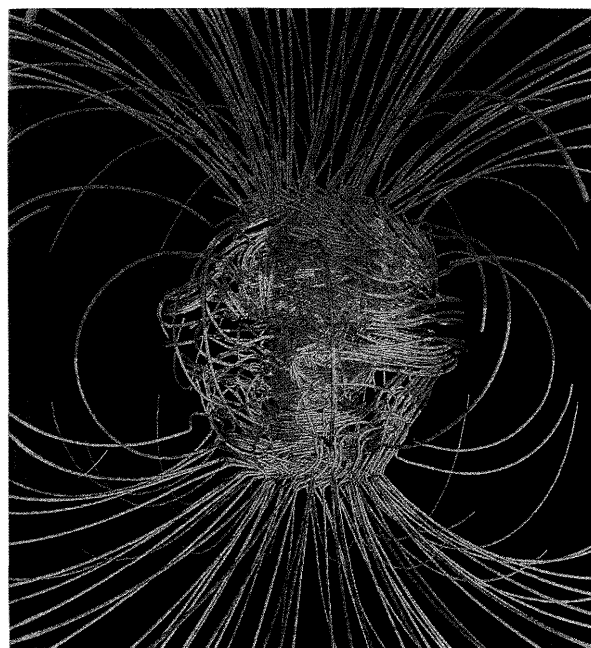


Fig. 9 Magnetic field structure obtained by the Glatzmaier-Roberts (G-R) simulation model.

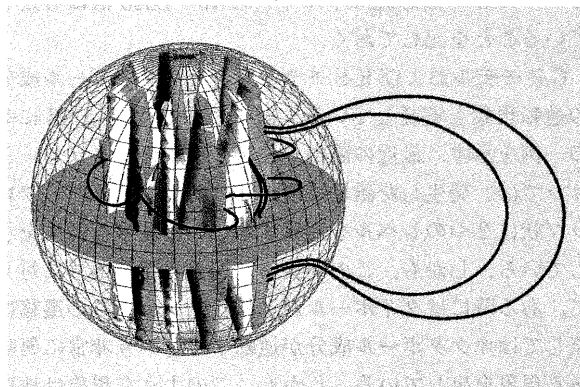


Fig. 8 Well-organized cyclone-anticyclone convection columns obtained by the Kageyama-Sato (K-S) simulation model.

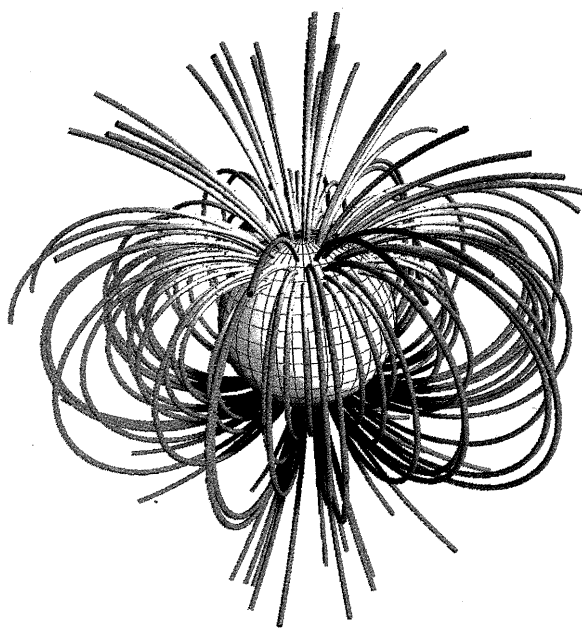


Fig. 10 Magnetic field structure obtained by the Kageyama-Sato (K-S) simulation model.

る。それは、磁場閉じ込め核融合研究にとって閉じ込め磁場の強度が閉じ込めプラズマ性能を決定する一つの大きな要因であるということに関連している。磁場強度が、例えば100テスラが簡単に生成できるならばプラズマ密度、温度、閉じ込め時間を増やすことに現在ほど苦労しなくてもよいであろう（シンクロトン放射や関連する諸々の他の条件には触れないとの仮定の下で）。地球磁場のエネルギー密度はその直接のエネルギー源である対流エネルギーの1,000倍も大きいといわれている。このことはダイナモ機構をうまく使うことによって核融合反応で発生した熱源を用いて熱対流を生成し、自励的に閉

じ込め磁場強度を増大させることの科学的可能性を示唆しているといえる。したがって、ダイナモ研究は将来磁場閉じ込め核融合にとっても重要な課題となりうる可能性を教えてくれている。我々の研究グループにおいてもシミュレーションチームを編成し、燃焼プラズマにお

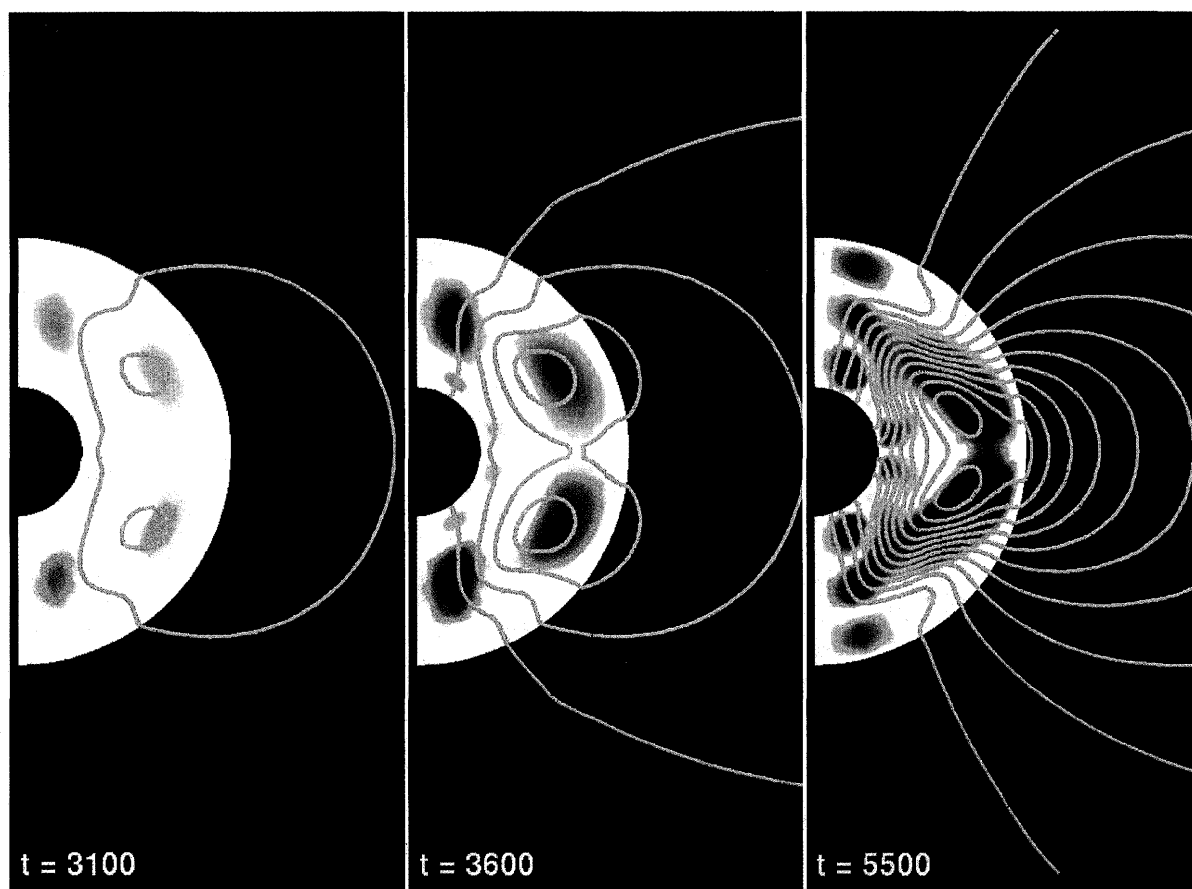


Fig. 11 Creation of the dipole-like magnetic field (yellow line) and the associated toroidal field contours (red and blue) obtained by the K-S simulation model. Note that the red and blue indicate the opposite polarities of the toroidal component.

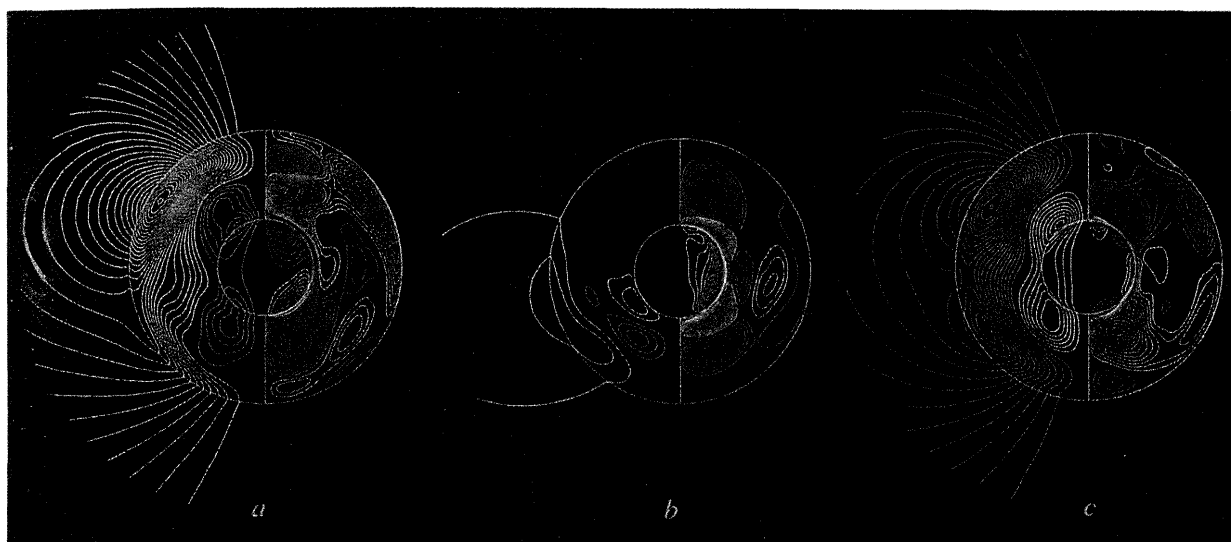


Fig. 12 Reversal of the G-R magnetic field (the left-half indicates the poloidal component and the right-half the toroidal component).

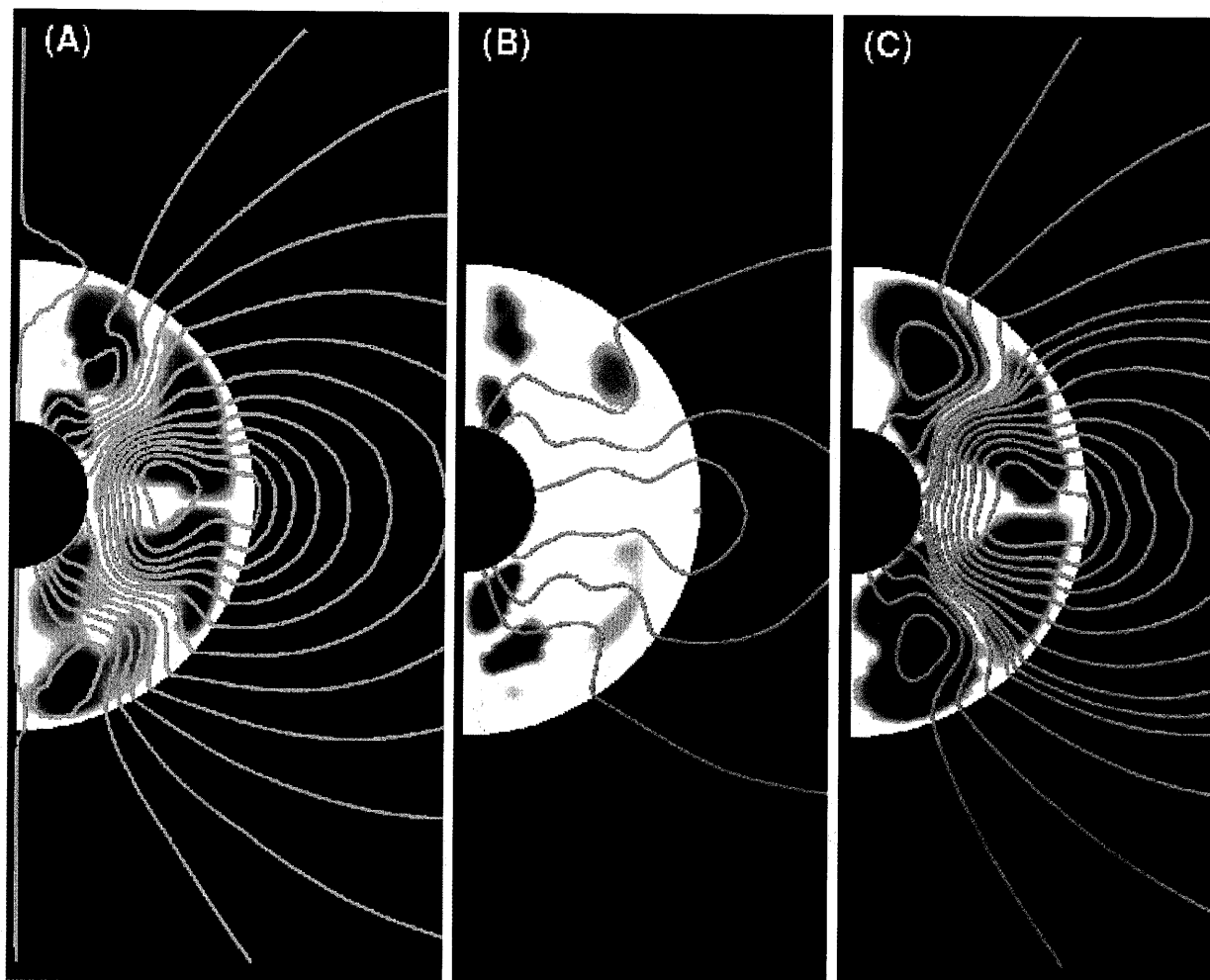


Fig. 13 Reversal of the K-S magnetic field.

ける閉じ込め磁場配位の自己増殖機構を探る研究をスタートさせている。

参考文献

- [1] R.T. Merrill, M.W. McElhinny and P.L. McFadden, "The Magnetic Field of the Earth," *International Geophysics Series*, Vol. 63 (Academic Press, 1996).
- [2] J. Needham, "Science and Civilization in China," Vol. 4, Physics and Physical Technology, Part 1, Physics (Cambridge University Press, Cambridge)
- [3] 河野 長: 地球科学入門 — プレート・テクトニクス (岩波書店, 1986).
- [4] 河野 長: 科学 **66**, 816 (1996).
- [5] G.A. Glatzmaier and P.H. Roberts, *Nature* **377**, 203 (1995); *Science* **274**, 1887 (1996); *Physica D* **97**, 81 (1996).
- [6] A. Kageyama and T. Sato, *Phys. Plasmas* **2**, 1421 (1995); *Phys. Rev. Lett.* **55**, 4617 (1997); *Plasma Phys. Control. Fusion* **39**, A83 (1997); preprint.