

地磁気ダイナモとマントルダイナミクス

浜 野 洋 三* 柳 澤 孝 寿** 山 岸 保 子**

Geodynamo and Mantle Dynamics

Yozo HAMANO*, Takatoshi YANAGISAWA** and Yasuko YAMAGISHI**

Abstract

Recent progress of numerical simulations on the dynamo process in the core and the mantle convection provides a clue to understanding the origin of global variations of the Earth system during the last 150 Ma, in which long-term variations of geomagnetic reversal frequency and mantle activity are closely related in time. Recent MHD dynamo simulations suggest that the increase of the total heat flow through the CMB changes the geodynamo from stable dipolar dynamos to unstable multipolar dynamos, and on axially symmetric and equatorial symmetric pattern of heat flux produces stable dipolar dynamos. Numerical modelings of mantle convection indicate 3 convection regimes, whole-mantle, intermittent, and 2-layer convections, in a parameter space of the Rayleigh number (Ra) and the Clapeyron slope (dP/dT) of the phase transition at a depth of 660 km. In the intermittent convection regime, the convection vacillates between whole-layer and the 2-layer regimes, and the surface and CMB heat flows fluctuate with time. The global variation of the Earth system might be attributed to this intermittent convection mode of the present Earth. However, the apparent out of phase variation of the total heat flow through the CMB inferred from the reversal frequency and the mantle activity requires some mechanism for the phase shift of the variations..

Key words : geodynamo, geomagnetic reversal, Cretaceous superchron, mantle convection

キーワード : 地磁気ダイナモ, 地磁気逆転, 白亜紀スーパークロン, マントル対流

I. はじめに

地球磁場は地球中心部にあるコアでのダイナモ作用によって生成・維持されている。地球のような惑星で起こるダイナモ作用には、導体の流体核、自転、そして対流運動の存在が必要な要素である。特に対流運動はダイナモ作用で磁場を

維持するための原動力、エネルギー源として重要である。地球のコアは岩石で作られたマントルに周囲を囲まれているために、コア マントル境界 (CMB) を通しての熱輸送がコアの対流運動の活発さを決める。一方、マントル中の熱輸送も対流運動によって担われており、マントルの対流運動を起源とする表層活動とコアで生成される磁場の

* 東京大学大学院理学系研究科

** 海洋研究開発機構地球内部変動研究センター

* Department of Earth & Planetary Science, University of Tokyo

** IFREE, Japan Marine Science Research Developing Organization (JAMSTEC)

変動とは密接に関係していると考えられる。

これまでに得られている地質記録で、マンツルの変動とコアの活動との相関が明らかに見られるのは、磁場の逆転頻度の長期変動とマンツル表層の火山活動との関係である。地球磁場の逆転は、地球の歴史の中では頻繁に起こり、最近 1000 万年間の逆転頻度は 100 万年に 5 回程度である。一方、1 億年前の白亜紀中期を中心とするおよそ 4000 万年間は、白亜紀スーパークロンと呼ばれる逆転のない時期である。この時期から逆転頻度は徐々に高くなってきて現在に至っている。白亜紀スーパークロンの時期以前については、昔にさかのぼるに従って逆転頻度が逆に高くなる。このような 1 億年から 2 億年の時間スケールを持つ長期的な変動は、地球の各圏の変動にも見られる。白亜紀スーパークロンの時期は、地表では極めて温暖な気候が支配し、図 1 に示されるように高緯度地方の気温は高く、南極や北極にも大陸氷床がない温室地球の時代として知られている。白亜紀中期から現在まではだんだんと寒冷化している。表面温度と同様の変化はまた海水面の高さの変動にも見られる。

マンツル活動に関しては、白亜紀スーパークロンの時期には、海嶺での海洋底の生成速度が大きく、さらに巨大火山岩地域の代表であるオントンジャワ海台やケルゲレン海台等の巨大海台が生成されている。この時期には、マンツルの活発な活動によって深部から熔融した高温の物質が表面に運ばれ、地表への熱輸送量は極めて大きかったと考えられる。このような大規模なマンツル活動の起源として、Larson (1991) によってスーパーブルームの考え方が提案された。スーパーブルームはコアマンツル境界から立ち上る巨大な高温のブルームである。スーパーブルームの形成と上昇が、コアマンツル境界の熱輸送形態に影響を及ぼし、それが地球磁場の逆転をとめる働きをした、と考えられた。一方ではマンツル表層の活発な活動による二酸化炭素等の地表からの放出が、気候変動と結びつけられた。また、地震波トモグラフィによって明らかになった、南太平洋とアフリカ大陸の下部マンツルで見られる巨大な

高温領域の存在がスーパーブルームの実態とされた。

しかしながら、このような大規模な高温域の存在は、マンツルを通しての対流が比較的に不活発な場合に見られるものであり、コアからの熱輸送の増大と直接は結びつかない。地球の歴史の中では、白亜紀スーパークロンのような地磁気逆転のない時期は、何度も繰り返していた証拠が示されているが、このような変動のリズムが作り出された原因についても、スーパーブルームの考え方で説明することは難しい。

最近活発に行われるようになった地球ダイナモやマンツル対流の数値シミュレーションは、上に述べた最近 1 億 5000 万年間の地球システムの長期変動の起源の解明のための新しい手がかりを与えつつある。

II. ダイナモシミュレーション

1995 年以来行われるようになった地球ダイナモの数値シミュレーションは、流体核においてダイナモ作用によって自発的に磁場が作られ、生成される磁場は現在の地球と同程度に双極子が卓越することを示した。また、いくつかのダイナモモデルでは双極子磁場の逆転も実現されている（例えば、Buffet, 2000 参照）。さらに、生成される磁場とコア表面での熱境界条件との関係も調べられており、マンツル活動による CMB 近傍の熱構造の変化が、地磁気ダイナモの逆転の有無に影響を与えることが示された。Kutzner and Christensen (2002) は、対流運動の活発さの指標であるレーリー数をパラメーターとし、対流が起こり始める臨界レーリー数の数 10 倍までの範囲で、ダイナモシミュレーションを行った。この計算結果は、レーリー数が増加するに従って、逆転しない双極子が卓越する安定なダイナモから、波長の短い非双極子成分が卓越する不安定なダイナモに移り変わることを示す。遷移の中間段階では、安定ダイナモ状態と不安定ダイナモ状態の間を移行するモードが実現される。このモードのダイナモでは、地磁気のエクスカッションや逆転が、地球と似通った時間スケールで起こっている。磁場

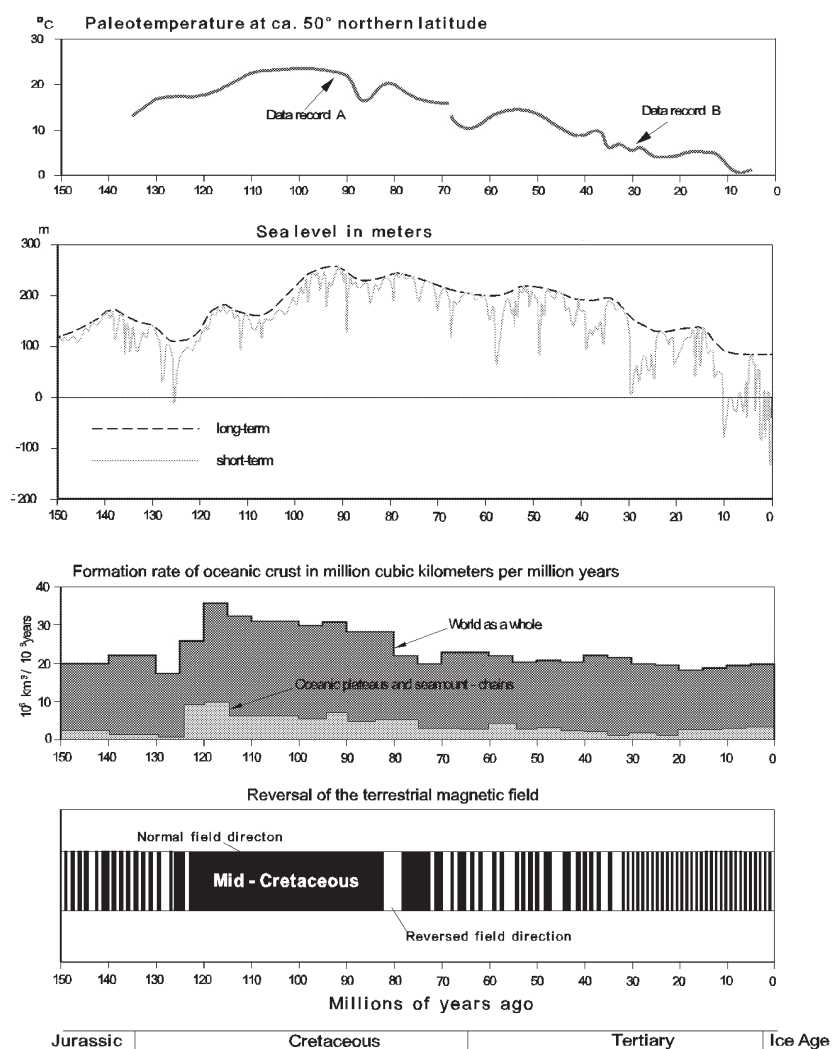


図 1 最近 1 億 5000 万年間の地球システム変動。
北半球高緯度（～50°）での古気温変動，海水準変動，海嶺での海洋底地殻の拡大速度および海台や海山の生成速度，地磁気逆転史を示す。Larson(1991)による。
Fig. 1 Global variations of the Earth system observed during the last 150 million years.
High latitude surface temperature, sea level, production rate of oceanic crust, and geomagnetic reversal sequence are shown from the top to the bottom. According to Larson(1991).

の形状についても，双極子磁場と非双極子磁場の比率は地球磁場に近い。CMB を通しての熱流量の増大に伴って，安定な双極子が卓越する安定ダイナモ状態が実現し，さらに熱流量が増大すると，不規則に逆転する不安定ダイナモモードに遷

移することは，より現実の地球に近づいたシミュレーション結果（高橋，2005）においても，同様に示されている。

コア表面の熱境界条件として，CMB での熱流量の分布とダイナモ作用の関係についても検討さ

れている。Glatzmaier *et al.* (1999) は CMB での様々な熱流量分布に対して、ダイナモシミュレーションを行った。このシミュレーション結果は、CMB での熱流量分布が軸対称、赤道対称、および高緯度での熱流量が大きい場合に、逆転しない双極子が卓越する安定ダイナモが作られることを示している。一方で、熱流量分布が非軸対称で、熱流量が低緯度で大きい場合には、ダイナモは不安定になり、頻繁に逆転を繰り返す。

ダイナモシミュレーション結果は、CMB を通した熱流量および熱流量パターンの変化が、コアのダイナモ過程に影響を与え、磁場逆転頻度を変化させる可能性を示す。このメカニズムが実際の地球での逆転頻度の長期変動の起源となっているかどうかを確かめるには、上記のダイナモシミュレーションに加えて、マンツルの活動を調べる必要がある。マンツル対流で 1 億年程度の時間スケールの変動が引き起こされるかどうか、またマンツル表層の変動と CMB での熱流量変動との関係はどうなっているか、の 2 点が主な課題である。

III. マンツル対流シミュレーション

コアの対流運動と比較して、マンツル対流は粘性が極めて大きい流体の対流運動であるため、運動速度は年間数 cm と極めてゆっくりしている。マンツルを構成する岩石は、粘性係数の温度変化も極めて大きく、温度が低くなると急激に粘性係数が増大してかたくなる。この性質は地球の表層でプレートテクトニクスの活動を生じさせる原因となっている。しかし粘性の急激な温度変化だけでは、金星のように厚い動かない殻が対流層の表面を覆ってしまうことが、これまでのマンツル対流シミュレーションの結果からも示され、プレートテクトニクスの活動を実現することが、マンツル対流シミュレーションの重要な課題となっている。マンツル対流を特徴づけるものとしては、さらにマンツルが 3 次元球殻であること、内部に放射性元素による熱源を持つこと等があるが、長期変動のリズムを生じさせる原因として注目されるのは、マンツル遷移層でのマンツル鉱物の相転

移の影響である。

マンツルの主要構成鉱物であるオリビンがマンツル遷移層で高压起源の相転移をおこし、より密度の高い結晶構造に転移する。標準的な温度構造を仮定すると、低压で安定なオリビン構造が 410 km の深さで β スピネル (Wadsleyite)、520 km の深さで γ スピネル (Ringwoodite) に移り変わり、さらにこの相は 660 km の深さでは、ペロプスカイト構造を持つ MgSiO_3 と (Mg, Fe) O に分解する。相転移によって密度が高くなり、地震波速度は増大するため、遷移層では、地震波速度は不連続に上昇する。これらの相転移の転移圧は温度によって変化する。転移圧の温度勾配、 dP/dT 、のことをクラペイロンスロープと呼ぶ。深さ 410 km および 520 km の相転移は dP/dT が正である。一方、660 km での転移ではクラペイロンスロープが負となっている。特に、660 km の深さでの負のクラペイロンスロープを持つ相転移層の存在は、マンツル対流に重大な影響をもたらす。この層を通しての対流運動が減速され、場合によってはこの層の上下に 2 層の対流を生じることもある。相転移の効果については従来からマンツル対流のシミュレーションでも取り入れられ、レーリー数が高いときに二層対流、レーリー数が低くなると全層対流的な振る舞いをする事が示されているが、対流の活発さとクラペイロンスロープの関係を系統的に調べた研究は少ない。ここでは、最近行った 3 次元球殻マンツル対流のシミュレーション結果を示す。このシミュレーションでは、クラペイロンスロープの大きさと対流パターンの変化の関係について、系統的なパラメータスタディーを行っている。この計算には有限要素法の汎用プログラムである TERRA コード (Baumgardner, 1985; Bunge *et al.*, 1996) を使用した。計算は、水平解像度約 30 km、半径方向 128 分割、マンツルの上面および下面の境界条件としては、温度固定、力学的には自由端で行った。

シミュレーション結果に基づき、クラペイロンスロープとレーリー数のパラメータ空間で起こる各対流モードの領域を図 2 に示す。定常状態

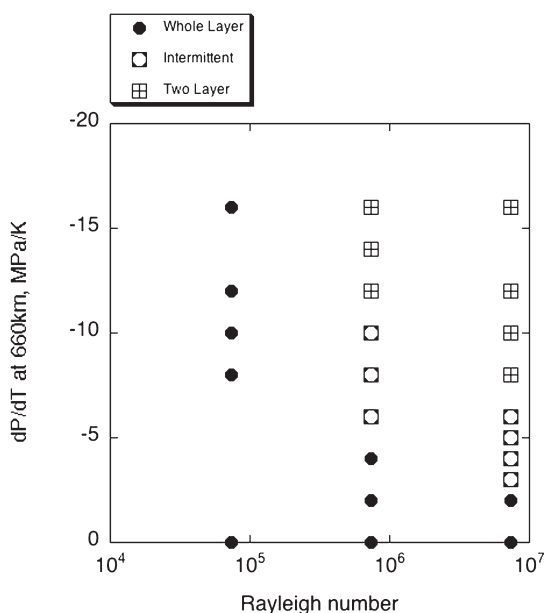


図 2 マントル対流シミュレーションを行ったパラメーター範囲を示す。

パラメーターとしてはレーリー数と深さ 660 km での相転移圧力の温度効果 (クラペイロンスロープ) をとっている。定常状態での対流モードが、全層対流、二層対流、間欠対流の場合を区別して示す。

Fig. 2 Modes of the mantle convection (whole layer convection, two layer convection, and intermittent convection) in a parameter space of the Rayleigh number (Ra) and the Clapeyron slope (dP/dT) of the phase transition at a depth of 660 km.

の対流は、全層対流、二層対流、そして間欠的対流の 3 つのモードが存在する。レーリー数が小さい場合にはクラペイロンスロープの負の値を大きくしても、全層対流のモードしか現れず、対流運動はマントル全体で起こっている。レーリー数が大きくなると、クラペイロンスロープの値によって、3 つのモードが現れる。負のクラペイロンスロープの絶対値が大きくなるに従って、全層対流、間欠対流、二層対流の順に遷移する。間欠的な対流モードでは、下降流、上昇流は、マントル遷移層近傍に一定期間留まった後に、それぞれ下部マントルおよび上部マントルに下降および上

昇していく。この滞留期間は二層対流の領域に近づくに従って長くなる。このモード転移のクラペイロンスロープの絶対値は、レーリー数が大きくなる程、小さくなる。

地球変動のリズムを生じさせる原因として、間欠的な対流モードが、特に注目される。全層対流および二層対流の状態では、マントルを通しての熱流量は、定常状態では一定に保たれる。一方、間欠対流モードでの熱流量は、定常状態になった後でも時間的に変動する。図 3 には、間欠対流モードの場合の、定常状態に達した後およそ 7 億年分の熱流量の変動を示す。図 3 のパラメーターでは、変動が 2 億年程度の時間スケールで起こり、下部境界での熱流量の変動振幅はおよそ 20% である。熱流量の時間変動は、表面でも下面でも、急激な増大とゆっくりした減少というパターンを示す。また変動の位相は上面と下面で差が見られない。図 3 には対流層全体の運動エネルギーの変化も示してある。運動エネルギーの増加は、熱流量の急激な増加の期間に対応している。この運動エネルギー増加の原因の場所を特定するため、図 4 にマントル遷移層近傍の各深さでの温度変化を示す。660 km 不連続面近傍を境として、下部マントルから上部マントルへ的高温物質の上昇、上部マントルから下部マントルへの低温物質の下降が、変動の原因となっていることが明瞭に示され、660 km 面近傍に滞留した下降流および上昇流が、突然動き出すのが、変動のきっかけであることが認められる。

4 億年から 6 億年までの 1 サイクルについての詳しい変動の様子を口絵 1 に示す。4 億年から 5000 万年毎に温度分布の断面図と表面直下、深さ 660 km、および CMB 直上の場所での水平面内での温度分布がそれぞれ示されている。(1) $t = 4$ 億年では下降流はマントル遷移層に滞留していて遷移層内での温度不均質は大きい、表面および CMB での熱流量は極小であり、温度分布の水平方向の不均質は小さくなっている。一方、(2) $t = 4$ 億 5000 万年では、すでに崩落がスタートし、CMB では下降流による低温域のスポットが数ヶ所見られる。一方、表層では、上昇

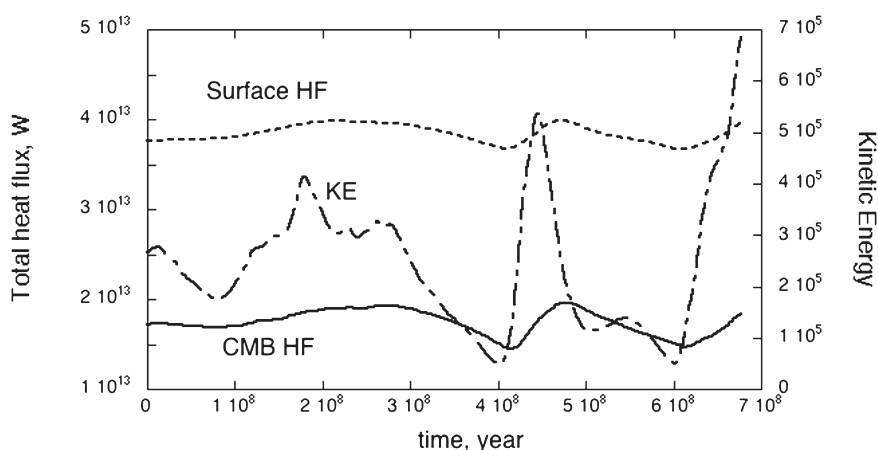


図3 レーリー数 $Ra = 7 \times 10^6$ で間欠対流モード ($dP/dT = -6 \text{ MPa/K}$) の計算結果．7 億年間の表面およびCMBの熱流量の時間変化．熱流量が急激に増大する期間に運動エネルギーが大きくなっている．

Fig. 3 Results for intermittent convection mode.

$Ra = 7 \times 10^6$, $dP/dT = -6 \text{ MPa/K}$. Calculated time series of the surface and CMB heat flow for about 700 million years. Variation of kinetic energy of the whole mantle is also shown.

流が 660 km 面を越えて表面に達した高温域のスポットが見られる。その後時間が経つに従って、このようなCMBでの高温域および表面での低温域は弱く小さくなっていく。(5) $t = 6$ 億年では、660 km 不連続面の上部に下降流が滞留しており、次の崩落が始まる直前の状態を示している。

現在のシミュレーションモデルでは圧力減少のために部分熔融状態になりマグマが発生するプロセスは組み込まれていないが、実際の地球のマントル物質の場合は、このような高温物質の上昇によってマグマの発生が期待される。発生したマグマは分離されて表面に噴出することが考えられる。表面で観測される大規模火山活動がこのような原因によって生じたと考えることができよう。また、温度および熱流量分布のCMBでの不均質は、表層での活動が活発な時期に対応して、下降流がマントル最下部の熱境界層を破壊してCMBに達することによって最大となっている。マントル表層での熱流量の上昇とCMBでの熱流量の上昇が位相差が小さいことは、表層活動からCMBでの熱流量の変動を推定するために重要である。2 億年程度の周期を持つ変動の場合については、

このずれは長くとも 1000 万年から 2000 万年程度と見積もられ、表面で観測される火山活動の活発な時期には、CMBを通しての熱流量も大きかったことを示している。

熱流量分布については、(2) の状態でCMB近傍の不均質が大きくなっていることが示されている。この時期は、表面および下面での熱流量の極大の時期に対応している。下降流によって下部熱境界層上部の低温物質がCMBに達することによって、スポット的に熱流量が増大することで不均質が生じている。この冷たい塊はコアと周辺からの熱で暖められ、およそ 1 億年程度の時間で、周りと同化する。

IV．マントル変動とコア変動の相互関係

マントル遷移層での相転移のクラペイロンスロープをパラメーターとしたマントル対流のシミュレーション結果は、間欠対流モードが存在することを示している。この対流モードでの間欠性は、660 km 不連続面での上昇流、下降流の一時的な滞留によって起こっている。この変動はマントル活動の変動のリズムを生み出し、さらに

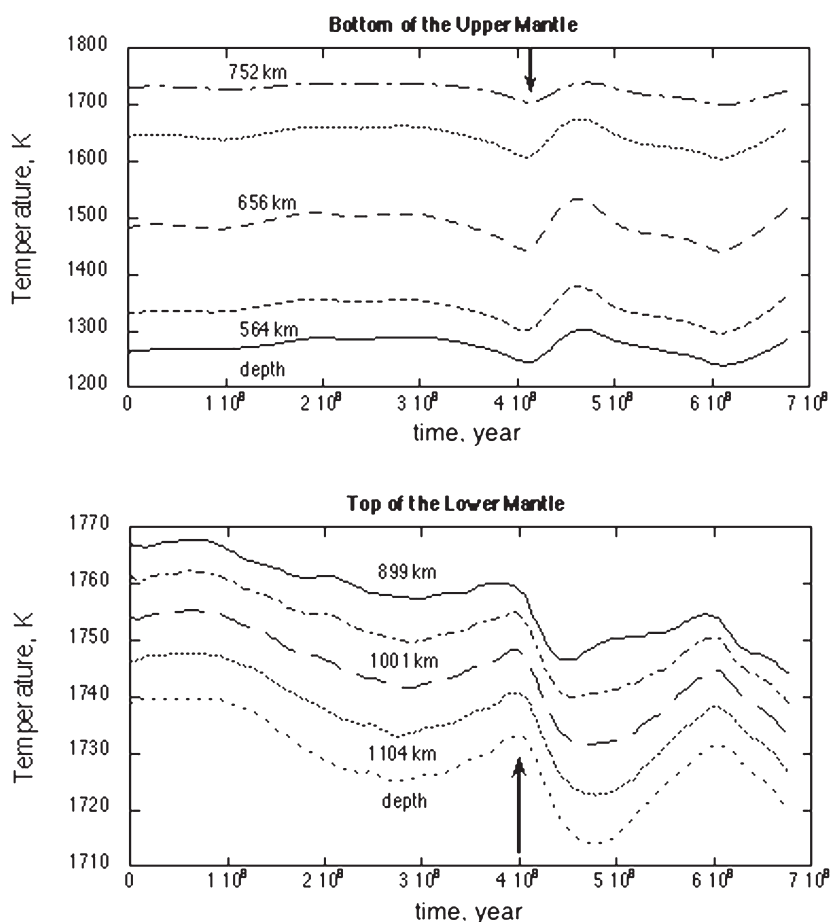


図 4 7 億年間の深さ 660 km 近傍の温度変化。
矢印で示す時期での二層対流の崩壊開始後、上部マントル（上図）では高温物質の上昇に伴う加熱、下部マントル（下図）では低温物質の下降による冷却が起こっている。

Fig. 4 Temporal variations of the temperature at the depths around the mantle transition zone.

The variations at the bottom of the upper mantle (top) and the top of the lower mantle (bottom) are in opposite sense with each other.

CMB の熱構造に影響を与えることにより、コアのダイナモ作用に影響する可能性を示唆する。1 億 5000 万年間の表層のマントル活動の推移を、マントル対流シミュレーション結果で得られた間欠対流の 1 サイクルと対応させると、二層対流の崩壊はおよそ 1 億 3000 万年前ごろに始まり、1 億年前ごろには地表熱流量は最大になる。また、現在は表層からの下降流やマントル下部から

の上昇流が遷移層近傍に滞留している状況に対応する。CMB の熱流量の時間変化は、白亜紀スーパークロンの時期に熱流量は最大となり、その後現在まではだんだんと減少してきたことが推定される。白亜紀スーパークロンの時期には、CMB での熱流量の不均質も大きく、その後は不均質は小さくなってきたことも示唆される。

一方、地磁気逆転頻度の長期変動を、ダイナモ

シミュレーション結果と対応させると、白亜紀スーパークロンの時期には、逆転がない安定したダイナモが支配していたことから、CMBを通した熱輸送量は小さかったと推定される。その後、現在までの逆転頻度の増加は、熱流量がだんだんと増大してきたためと解釈される。また、熱流量不均質は、白亜紀スーパークロンの時期には東西方向の不均質は小さく、軸対称的な熱流量分布があったことが推定される。

このようにマントル対流シミュレーションの結果とダイナモシミュレーション結果は、660 km 不連続面での負のクラペイロンスロープが、1 億年スケールのCMBを通した熱流量変動を作り出す可能性を示唆するものの、変動の時間変化については、全く逆位相の見積もりを与える。白亜紀スーパークロンの頃は、マントル活動からは熱流量極大、コア活動からは熱流量極小が予測される。この食い違いの原因については、これまでのシミュレーション結果だけから結論を得ることはできず、今後の課題として残されているが、ダイナモシミュレーション、マントル対流シミュレーションの両面からの研究が必要であろう。

従来のダイナモシミュレーションでは、計算の安定性のために、実際の地球に比べて、粘性の効果が大きく、回転の効果が小さい領域（エクマン数が多い）で行っていて、対流の活発さを表すレイリー数についても、対流が起こり始める臨界レイリー数の数 10 倍までの範囲に限って、シミュレーションが行われている。より地球に近いパラメーターでのダイナモでは、従来と全く違ったモードのダイナモが存在するという可能性は考えられる。磁場生成には東西方向の流れ、いわゆる ω 効果が重要な役割を果たしており、上述のシミュレーション結果は、レイリー数の増大や東西方向の不均質によって、この大規模な東西流を妨げることで、安定なダイナモが得られなくなっていると考えられる。より回転の効果が大きいダイナモモデルでは、回転の効果のためによりレイリー数の高いところで大規模流が生じ、安定なダイナモができる可能性はあるかもしれない。しかし、これを確かめるには計算機の更なる進展を待

つ必要がある。一方、現在のシミュレーション結果が、実際に地球の状況を表しているかについては、観測的に調べることは可能である。シミュレーション結果では、逆転のない安定なダイナモでは双極子磁場が卓越し、磁場強度も大きい。また磁場変動についても、逆転するダイナモモデルに比較して、逆転間隔よりも短い時間スケールでの磁場変動も小さくなっている。白亜紀スーパークロンの時期の磁場強度、磁場の空間分布、時間変化を古地磁気学によって調べることによって、シミュレーション結果が実際の地球で実現しているかどうかを明らかにすることは、重要であろう。

マントル対流については、変動の起源がマントルの対流層内部の変動であるかぎり、どのような変動であっても表層活動の変動と下部での変動に、大きな時間差を作ることは難しい。対流層下部の熱境界層ではCMBと境界層上部の間に大きな温度差があるため、境界層の直上の部分が下面に接することで、すぐに熱流量が増加するためである。時間差を作り出すためには、マントル対流に参加しない、停滞した安定層がマントル最下部に存在する必要がある。1 億年程度の位相差を作り出すためには、停滞層の厚さは 50 km 程度となる。しかし、このような熱伝導層の存在は、熱流量の変動振幅を減少させることになるので、コアに十分な影響を与えられるかどうかについては、マントルとコアの両方の活動についてのシミュレーションが必要とされよう。

文 献

- Baumgardner, J.R. (1985) Three dimensional treatment of convective flow in the Earth's mantle. *J. Statistical Physics*, **39**, 501–511.
- Buffett, B.A. (2000) Earth's core and the geodynamo. *Science*, **288**, 2007–2012.
- Bunge, H.P., Richards, M.A. and Baumgardner, J.R. (1996) Effect of depth-dependent viscosity on the planform of mantle convection. *Nature*, **379**, 436–438.
- Glatzmaier, G.A., Coe, R.S., Hongre, L. and Roberts, P.H. (1999) The role of the Earth's mantle in controlling the frequency of geomagnetic reversals. *Nature*, **401**, 885–890.
- Kutzner, C. and Christensen, U.R. (2002) From sta-

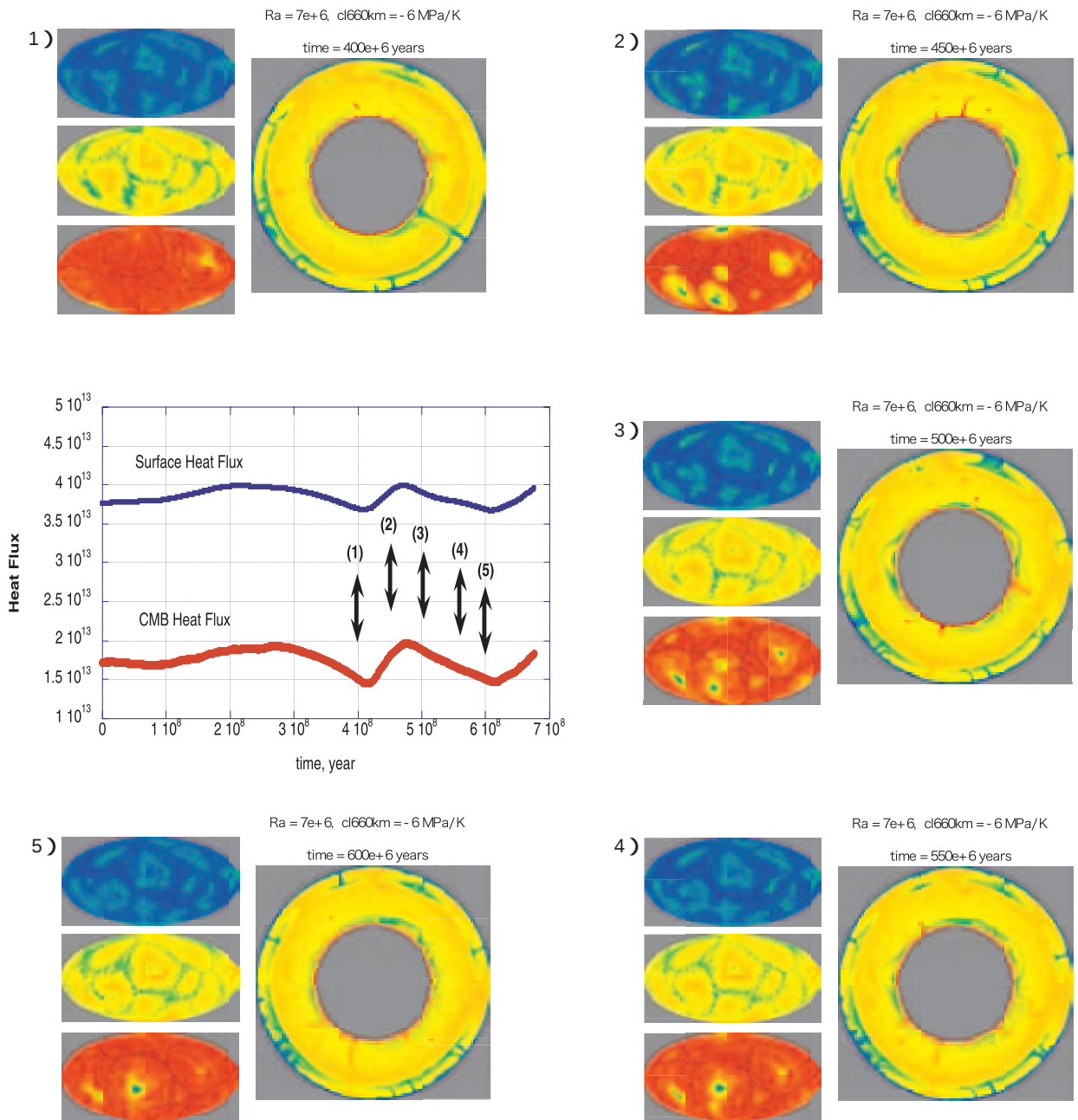
ble dipolar towards reversing numerical dynamos.
Phys. Earth Planet. Interiors, **131**, 29–45.
Larson, R. (1991) Geological consequences of super-
plumes. *Geology*, **19**, 963–966.

高橋 太 (2005) 地球惑星ダイナモシミュレーション
の新たな発展. 地学雑誌, **114**, 123–131.

(2004 年 12 月 20 日受付, 2005 年 2 月 25 日受理)

口絵 1 : マントル対流シミュレーション結果 — 間欠モード対流 ($Ra = 7 \times 10^6$, $dP/dT = -6 \text{ MPa/K}$) の1サイクルにおける熱流量と対流パターンの時間変化 —

Pictorial 1 : Results of the Numerical Simulation of the Mantle Convection: Temporal Variations of the Convection Pattern and the Surface and CMB Heat Flow during One Cycle of the Intermittent Convection



中央のグラフは7億年分の計算期間における表層およびCMB（コア・マントル境界）を通した全熱流量の時間変化を示す。表層とCMBでは熱流量はほぼ同位相で変動している。周囲のパネルは、変動の1サイクル中での対流パターン（温度分布）の様子を示す。各パネルで左の図は、表面直下（上）、深さ660km（中）、CMB直上（下）の球面上の温度分布、右の図は温度分布の断面図を表す。(1) $t = 4$ 億年では、下降流、上昇流は深さ660km近傍に滞留し、表層およびCMBでの熱流量は極小となっている。(2) $t = 4.5$ 億年は滞留した下降流の崩落が始まり、同様に上昇流は660km面を突き破って表面に到達している。熱流量は急激に増大し極大となっている。(3) $t = 5$ 億年、(4) $t = 5.5$ 億年では下降流の崩落に伴う運動は沈静化し、熱流量はゆっくりと減少している。(5) $t = 6$ 億年は次の崩落が始まる直前の状況を示す。

Temporal variations of the surface and CMB heat flows are shown in the graph at the center. Both the heat flows varies in phase. 5 panels surrounding the graph show the convection pattern at (1) $t = 400 \text{ Ma}$, (2) $t = 450 \text{ Ma}$, (3) $t = 500 \text{ Ma}$, (4) $t = 550 \text{ Ma}$, and (6) 600 Ma . In each panel, lateral temperature distributions of the surface layer (top), 660 km depth (middle), and bottom layer (bottom) are shown to the left and a cross section of the temperature distribution is shown to the right.

(浜野洋三・柳澤孝寿・山岸保子 Yozo HAMANO, Takatoshi YANAGISAWA and Yasuko YAMAGISHI)