MHDダイナモシミュレーションにおける磁場構造と生成領域にみられる自転角速度効果の検討

Investigation of effects of Earth's rotation on the generated magnetic field structure in the MHD dynamo simulation

松井 宏晃 [1], 大家 寛 [2]

Hiroaki Matsui [1], Hiroshi Oya [2]

[1] 東北大・理・地球物理, [2] 東北大・理・地球物理学

[1] Dept. of Geophysics, Tohoku Univ., [2] Geophysical Ist. Tohoku Univ.

地磁気ダイナモの基礎過程における球殻の自転の効果を明らかにするため、3つの場合のTaylor数(Ta)についてMHDシミュレーションを実施した。その結果、磁場エネルギーは対流エネルギーに対し、(a) $Ta=100$ の場合には、約1/10程度に留まったのに対し、高い回転速度を示す(b) $Ta=10000$ 及び(c) $Ta=250000$ の場合には同程度まで成長した。磁場構造の特徴として、磁場が弱い場合には球殻及び対流セルの境界に磁場の強い領域が生成されるのに対し、磁場エネルギーが対流エネルギーと同程度まで成長した段階にはセル内部にも磁場の強い領域が生成され、(b)の場合には赤道反対称成分が、(c)の場合には赤道対称成分が強くなる特徴が明らかにされた。

序

地球磁場成因の基本過程を解明するため、地球の外核に対し回転球殻モデルを適用し、熱対流の条件下でMHDダイナモシミュレーションを実施している。本研究では、磁場生成過程に対する球殻の自転角速度の効果を検証するため、実験的に比較的低い3つの場合のTaylor数(Ta)を適用した。その結果、どの場合においてもシミュレーションの初期には球殻の境界及び対流のセル構造の境界に集中して強い磁場をもつ構造が形成される一方、磁場が強くなり成長してくるときには対流セルの内部に集中的に強い磁場をもつ構造が形成された。また、各Taylor数ごとに異なる特徴をもつ磁場構造が発生し、それらについて比較、検討を行った。

シミュレーションの内容

外核に対し回転球殻モデルを設定し、熱対流によるMHDシミュレーションを実施した。角度方向は球面調和関数展開を行い、動径方向には2次精度の中心差分を用い、時間発展に関しては拡散項にはCrank-Nicolson法、その他の項にはAdams-Bashforth法を適用した。ここで、球面調和関数の打ち切り次数は18次まで、半径方向については63分割とした。速度場の境界条件については自由境界、磁場に関しては対象領域の外部を絶縁体とし、ポテンシャル場に接続する条件を与えた。

熱対流のパラメータとしては、(a) $Pr = 1$, $Ta = 100$, $Ra = 1200 (= 1.5 \cdot Ra_c)$, (b) $Pr = 1$, $Ta = 10000$, $Ra = 4000 (= 2.3 Ra_c)$, (c) $Pr = 1$, $Ta = 250000$, $Ra = 15000 (= 1.8 Ra_c)$ を適用した。さらに、それぞれの熱対流のパラメータについて Pm を変化させた。この場合、生成される磁場構造は、 Pm が大きいほど空間的に小さな磁場構造が誘導されやすくなるため、(a) - (c)のそれぞれの場合について磁場が成長した結果の中で Pm が最も小さい場合のシミュレーション結果について比較を行った。

シミュレーション結果

[Pm の影響] (a)の場合についてのシミュレーションの結果は $Pm = 50$ から磁場が生成、維持されたが、球殻内の磁場エネルギーは運動エネルギーの約1/10にとどまった。一方、(b)の場合には、 $Pm = 30$, (c)の場合には $Pm = 60$ から磁場が成長し、(b),(c)両者ともに磁場のエネルギーは対流の運動エネルギーと同程度の大きさに成長した。

[磁場の構造] 磁場エネルギーが対流エネルギーに比べ小さい場合、球殻の内側境界付近及び対流セル構造の境界付近に強い磁場が形成される一方、磁場エネルギーが運動エネルギーと同程度に成長した場合、対流セルの内部にも自転軸方向に発達した強い磁場が形成される。また、磁場が強くなり成長する場合、(b)の場合には赤道反対称成分が、(c)の場合、赤道対称成分がそれぞれ強く生成されるという相違が明らかになった。

[磁場エネルギーが生成される領域] (a)の場合には磁場エネルギーは、球殻の内側境界付近においてそのほとんどが生成され、また、その構造を定める緯度方向の波数がシミュレーションの打ち切り次数に対応する波数に近いことから、境界条件に依存し打ち切り次数の限界によってもたらされた、すなわち計算スキームの都合に依存した磁場であることが示唆される。(b), (c)の双方の場合においてもシミュレーションの初期においては(a)と同様な磁場エネルギーの生成領域が現れるが、磁場が成長した段階においては球殻の外側境界の赤道周辺において強い磁場エネルギーの生成が起こる。特に、(b)の場合、赤道上そのものよりも赤道周辺において最も強く磁

場エネルギーが生成されるのに対し、回転の速い (c) の場合においては赤道上で最も強く磁場が生成されている様相が明らかとなった。また、(b),(c) いずれの場合にも低緯度領域で外側境界付近においては自転軸方向に向かう成分の強い磁場が見られないことが (b) 及び (c) の場合における生成される磁場の赤道対称性の違いとなっていると考えられる。