

回転球殻 MHD ダイナモにおける力学的境界条件の影響

MHD dynamo in a rotating spherical shell: Influence of mechanical boundary conditions

佐々木洋平, 北大・理, 〒060-0810 札幌市北区北十条西 8 丁目, E-mail: uwabami@gfd-dennou.org

竹広真一, 京大・数理研, 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, E-mail: takepiro@gfd-dennou.org

林祥介, 神大・理, 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 E-mail: shosuke@gfd-dennou.org

倉本圭, 北大・理, 〒060-0810 札幌市北区北十条西 8 丁目, E-mail: keikei@ep.sci.hokudai.ac.jp

Youhei SASAKI, Faculty of Science, Hokkaido University, Kita-10 Nishi-8, Kita-ku, Sapporo, Japan

Shin-ichi Takehiro, RIMS, Kyoto University, Kitashirawaka Oiwake-chou, Sakyo-ku, Kyoto, Japan

Yoshi-Yuki Hayashi, Faculty of Sciences, Kobe Univ., Rokkoudai 1-1, Nada-ku, Kobe, Japan

Kiyoshi Kuramoto, Faculty of Science, Hokkaido University, Kita-10 Nishi-8, Kita-ku, Sapporo, Japan

Numerical experiments of magnetohydrodynamic dynamos driven by thermal convection in a rotating spherical shell with a free-slip top boundary and a no-slip bottom boundary are performed. Non-dimensional numbers for the experiments are the modified Rayleigh number $Ra = 100$, the Ekman number $E = 10^{-3}$, the Prandtl number $Pr = 1$, the ratio of inner and outer radii $\xi = 0.35$. The magnetic Prandtl number Pm is varied from 5 to 50. Time integration of non-magnetic thermal convection is carried out until a quasi-steady state is established, and then MHD dynamo calculation is carried out starting from the quasi-steady state with a dipole and toroidal magnetic field. In the non-magnetic thermal convection case, the obtained solution consists of well-organized spiral vortex columns aligned with the rotation axis. A strong prograde zonal flow is produced at the top of the spherical shell in contrast to the simulations with the both no-slip boundaries. In the MHD dynamo cases, calculated magnetic fields fall into decay at all magnetic Prandtl numbers. The strong prograde zonal flow, which is prominent in the case of non-magnetic thermal convection, does not appear, but a slow retrograde zonal flow is produced at the top of spherical shell. As a result, the omega effect expected from the strong zonal flows does not seem to operate effectively.

1. はじめに

近年の計算機の発達によって、太陽および惑星固有磁場の生成維持メカニズムを調べることを目指した 3 次元球殻内の力学的ダイナモ計算が行われるようになった。その計算の多くは両端で粘着条件あるいは両端で自由すべり条件を力学的条件として用い、 α^2 タイプのダイナモ解を得ている。しかしながらこれらの条件は太陽の対流層を考察する条件としては適切でないかもしれない。近年の日震学の結果から、太陽対流層の底部にはタコラインと呼ばれる、対流層と放射層との間をつなぐ強い成層安定度を持った遷移層が存在することが知られるようになった。観測によれば、放射層はほぼ一様に剛体回転しており、タコラインに強いシアが集中している。したがって、太陽対流層下端の力学的境界条件としては、放射層上端を境界として想定した粘着条件を用いるのが受け入れやすい。一方で対流層上端は剛体壁ではないので自由すべり条件を用いるのがよさそうである。そこで本研究では、下端に粘着条件、上端に自由滑り条件を課した回転球殻 MHD ダイナモの数値実験を行なった。このような力学的境界条件を用いることで、上層に形成されるであろう強い帯状流による ω 効果を通して α^2 タイプのダイナモ解とは異なる磁場生成維持機構を持つダイナモ解が得られることを期待した。

2. モデルと計算設定

用いた数値モデルは、三次元の回転球殻ブシネスク磁気流体モデルである。熱境界条件は温度固定条件、力学的境界条件として、球殻上端に自由滑り条件、球殻下端に粘着条件を課す。球殻の内径外径比を 0.35、エクマン数を 10^{-3} 、修正レイリー数を 100、ブランドル数を 1 に固定し、磁気ブランドル数を 5 ~ 50 の範囲で変化させて実験を行なった。計算は最初に磁場の存在しない静止場に対して温度擾乱を与えて熱対流計算を実行し、対流構造が準平衡状態に達した後に磁場を付与してダイナモ計算を行い、磁場の発達の様子を観察した。

3. 結果と議論

磁場の無い熱対流計算では、回転軸に沿った方向に伸びた規則正しい螺旋状の渦柱が東向きに伝播する準定常状態が得られた。両端を粘着条件にした場合に比べて強い東向きの流れが内核接円筒外部で形成された。この流れは赤道で極大となり、その南北幅はほぼ内核接円筒と球殻上端の接する位置で定まっている。

統計的平衡状態に達した熱対流場に磁場を付与したダイナモ計算では、磁気ブランドル数が 5 ~ 50 での全ての実験において与えた磁場は減衰した。上端に応力無し条件を課したにもかかわらず、磁場の無い熱対流場において得られていた強い東向きの帯状流は弱くなっていき、結果として得られた平均帯状流は西向きとなっている。また、磁場は高気圧性の渦に集中しているものの、内核接円筒の外側中低緯度領域および内核接円筒内部の中高緯度領域に集中しており、球殻表面へは殆んど出ていっていない。

磁場の生成維持機構のうち、内核接円筒外部では ω 効果による磁場生成はほとんど寄与していないことがわかる。また、内核接円筒内部では、パターンに負の相関が見られている。すなわち ω 効果はトロイダル磁場を弱める方向に働いている。また、内核接円筒外部の低緯度における東向きの帯状電流および高緯度における西向きの電流とは相関が見られるため、ある程度は α 効果が効いているのかもしれない。

講演では修正レイリー数をより大きくした実験結果を合わせて報告する。

謝辞

作図は電腦 Ruby プロジェクト (<http://ruby.gfd-dennou.org/>) において開発されたソフトウェアを用いて行なった。数値計算は、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 宇宙科学企画情報解析センターの NEC SX-6 を用いて行なった。