

回転球殻 MHD ダイナモ解に対する上部力学的境界条件の影響

The effects of the upper mechanical boundary condition on MHD dynamo solutions in a rotating spherical shell

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 Science, Kobe University, 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 (MHD) dynamos driven by thermal convection in a rotating spherical shell with a free-slip top boundary and a no-slip bottom boundary are performed. The Ekman number, the Prandtl number and the ratio of inner and outer radii are fixed to 10^{-3} , 1, and 0.35, respectively. The magnetic Prandtl number Pm is varied from 1 to 50. The modified Rayleigh number Ra is increased up to 15 times the critical value Ra_c . MHD calculations are carried out from non-magnetic thermal convection solutions with a weak dipole magnetic field on top of them, and dynamo solutions are obtained when $Ra \geq 1.87Ra_c$ and $Pm \geq 4$. The strong prograde zonal flows in the non-magnetic solutions disappear in the dynamo solutions as the evolution of magnetic fields, and slow retrograde zonal flows emerge at the top of the spherical shell. As a result, the omega effect which was expected from the strong zonal flows of the non-magnetic solutions does not operate effectively. All of the obtained dynamo solutions are considered to be categorized as the α^2 -type dynamo.

1. はじめに

近年の計算機能力の向上により、太陽および惑星固有磁場の生成維持機構を調べることを目指した三次元回転球殻内の磁気流体力学的ダイナモ計算が行われるようになった。しかしながら、これらの数値計算で扱える粘性率や拡散率などのパラメータは現実の天体での値とは数桁も異なっている。そのため計算結果が直接的に天体の固有磁場および内部の運動を表現できているか定かでない。したがって実際の天体や惑星の磁場を計算機上で模倣することを目指すシミュレーション研究と平行して、現状の計算機で得られる範囲での解の性質を吟味し力学的構造を理解し、パラメータや成層構造・熱源の有無・境界条件などの物理設定に対する依存性を調べておくことが、観測される天体固有磁場の生成維持機構についての洞察を深めることにとって有益であると思われる。

ダイナモ作用への影響が明らかになっていない物理設定の一つに力学的境界条件が上げられる。これまでの多くのダイナモ計算では、地球型惑星の天体中心核とその外側領域のマントルを想定し、外側境界の力学条件に滑り無し条件を用いている。その一方で、滑り無し条件では境界層における粘性散逸を過大評価してしまう、という理由から、力学的境界条件として応力無し条件を用いるべきであるという主張もある。また恒星やガス惑星におけるダイナモ作用を考察する場合には、力学境界条件としては応力無し条件が適切かもしれない。磁場の生成維持が力学的境界条件にどのように依存するかを系統的に調べた研究は少ない。これまでの研究においては定性的な考察を行っただけであり、力学的境界条件の違いが磁場の生成維持にどの様に影響を与えるのかは明らかにされていない。

そこで本研究では、球殻上端、球殻下端の力学的境界条件の組み合わせを変えて回転球殻 MHD ダイナモの数値実験を行い、力学的境界条件の違いが磁場の生成維持にどの様に影響を与えるかを系統的に調べることを目指している。今回は球殻上端の境界

条件の違いが磁場の生成維持にどの様に影響を与えるのかについて調べてみた。

2. モデルと計算設定

回転球殻中のブシネスク磁気流体を数値的に解く。境界条件は温度固定、球殻外部は不導体とする。力学的境界条件は、球殻上下端で滑り無し条件を課す場合と、球殻下端で滑り無し条件・球殻上端で応力無し条件を課す場合の二通りを考える。パラメータ設定として、内径外径比を 0.35、プランドル数を 1、エクマン数を 10^{-3} に固定し磁気プランドル数を 1 ~ 50 まで、修正レイリー数を臨界値の約 15 倍まで変えて計算を行なった。

計算は、最初に磁場の存在しない静止場 $u = 0, B = 0$ に対してランダムな温度擾乱を与えて熱対流計算を実行し、対流構造が統計的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。ダイナモ計算を開始する際に付与する磁場として $Ra = 100$ の場合の運動エネルギーの 0.01 倍のエネルギーを持つ弱い双極子磁場を初期値として与えた。

3. 結果

今回計算したパラメータ範囲では、 $Ra \geq 150, Pm \geq 4$ の場合にダイナモが成立した。両端に滑り無し条件を課した場合には $Ra = 100, Pm = 5$ においてダイナモが成立していることから、上端に応力無し条件を課した場合には磁場を生成維持するためにより大きな Ra が必要であるといえる。

また、初期に付与する磁場を小さくしたにもかかわらず磁場のない状況での回転と順方向の強い帯状流から期待された ω 効果は結局働かず、 α^2 ダイナモ解におちついた。このことは、初期磁場が小さくても運動エネルギーよりも数桁も大きくなるまでに磁場が発達してしまうことに一因がある。強い磁気圧の寄与で高気圧性循環が卓越するために、回転と順方向の強い帯状流が逆向きにまで弱められてしまっている。そのため ω 効果が効果的に働かなかったと考えられる。