

内核半径の異なる回転球殻における地球ダイナモ維持に必要なレイリー数に関する研究

西田 有輝 [1]; 加藤 雄人 [2]; 松井 宏晃 [3]; 熊本 篤志 [4]

[1] 東北大・理・地球物理; [2] 東北大・理・地球物理; [3] UC Davis EPS; [4] 東北大・理・地球物理

A study of the required Rayleigh number to sustain dynamo with various inner core radius

Yuki Nishida[1]; Yuto Katoh[2]; Hiroaki Matsui[3]; Atsushi Kumamoto[4]

[1] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ; [2] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [3] UC Davis EPS; [4] Dept. Geophys, Tohoku Univ.

It is widely accepted that the geomagnetic field is sustained by thermal and compositional driven convections of a liquid iron alloy in the outer core. The generation process of the geomagnetic field has been studied by a number of MHD dynamo simulations. Recent studies of the Earth's core evolution suggest that the ratio of the inner solid core radius r_i to the outer liquid core radius r_o changed from $r_i/r_o = 0$ to 0.35 during the last one billion years. There are some studies of dynamo in the early Earth with smaller inner core than the present. Heimpel et al. (2005) revealed the Rayleigh number Ra of the onset of dynamo process as a function of r_i/r_o from simulation, while paleomagnetic observation shows that the geomagnetic field has been sustained for 3.5 billion years. While Heimpel and Evans (2013) studied dynamo processes taking into account the thermal history of the Earth's interior, there were few cases corresponding to the early Earth. Driscoll (2016) performed a series of dynamo based on a thermal evolution model. Despite a number of dynamo simulations, dynamo process occurring in the interior of the early Earth has not been fully understood because the magnetic Prandtl numbers in these simulations are much larger than that for the actual outer core.

In the present study, we performed thermally driven dynamo simulations with different aspect ratio $r_i/r_o = 0.15, 0.25$ and 0.35 to evaluate the critical Ra for the thermal convection and required Ra to maintain the dynamo. For this purpose, we performed simulations with various Ra and fixed the other control parameters. That is, the Ekman, Prandtl, and magnetic Prandtl numbers were fixed to be $E = 10^{-3}$, $Pr = 1.0$, and $Pm = 3.0$, respectively. For the initial condition and boundary conditions, we followed the dynamo benchmark case 1 by Christensen et al. (2001). In this model, the inner core is electrically insulating and co-rotating with the core-mantle boundary. The results show that the critical Ra increases with the smaller aspect ratio r_i/r_o . Critical $Ra = 60, 100$ and 200 are required for $r_i/r_o = 0.15, 0.25$ and 0.35 cases. The required Ra to sustain dynamo has similar behavior to the critical Ra : $Ra > 200, 200$ and 400 are required for $r_i/r_o = 0.15, 0.25$ and 0.35 respectively. These tendencies are consistent with the results of Heimpel et al. (2005) for dynamo process in a large magnetic Prandtl number.

In this study, we performed dynamo simulations in the early Earth with different aspect ratio. It is confirmed that larger amplitude of buoyancy is required in the smaller inner core to maintain dynamo.

地球磁場は主成分が鉄で構成されている磁気流体が外核中で熱対流・組成対流することで維持されていると考えられている。地球磁場生成過程は数多くのMHDダイナモシミュレーションによって研究されてきた。地球コアの進化に関する最近の研究によって、固体の内核半径 r_i に対する流体の外核半径 r_o の比 r_i/r_o は、過去約10億年にわたって0から0.35へと成長してきたと考えられている。一方、地球磁場は35億年以上にわたり生成・維持されてきたことが古地磁気計測により示されている。近年、現在より内核サイズが小さい初期地球を想定したダイナモ研究が進められている。Heimpel et al. (2005) はシミュレーション結果に基づいて、ダイナモが維持されるレイリー数を r_i/r_o の関数として示した。Heimpel and Evans (2013) は地球内部の熱史を考慮に入れたダイナモ計算を実行した。Driscoll (2016) は熱進化モデルを基にした一連のダイナモ計算を行った。これらの過去の研究では、磁気プラントル数は地球外核中の現実の値より大きい値が用いられており、検討の余地が残されている。従来からダイナモ研究は精力的に進められているが、初期地球内部で駆動されていたダイナモを十分に理解するためには、さらなる考察が必要とされている。

本研究では、半径比を $r_i/r_o = 0.15, 0.25, 0.35$ とした条件下での熱対流駆動ダイナモシミュレーションをそれぞれ行い、対流が発生する臨界レイリー数およびダイナモを維持するために必要なレイリー数を評価した。すなわち、一連の計算ではレイリー数のみを変化させて、他のパラメーターについてはエクマン数 $E = 10^{-3}$ 、プラントル数 $Pr = 1.0$ 、磁気プラントル数 $Pm = 3.0$ と共通の値を用いてシミュレーションを実行した。初期条件・境界条件は Christensen et al. (2001) で提案されたダイナモベンチマーク case1 に従った。このモデルでは、内核が電氣的に絶縁されていて外核と共回転するダイナモモデルである。シミュレーションの結果から、半径比 r_i/r_o を小さくした場合、臨界レイリー数が大きくなることが示された。すなわち、 $r_i/r_o = 0.15, 0.25, 0.35$ に対し、臨界レイリー数はそれぞれ $Ra = 60, 100, 200$ となった。また、ダイナモ維持に必要なレイリー数も同様の傾向にあることが示され、 $r_i/r_o = 0.15, 0.25, 0.35$ のそれぞれの場合について $Ra > 200, 200, 400$ となった。以上の傾向は、本研究より大きな磁気プラントル数の値を用いてダイナモ計算を実施した Heimpel et al. (2005) の結果と一致している。

本研究の結果から、内核サイズが小さい場合、ダイナモを維持するためにはより大きな浮力が必要になることが示された。