

## 異なる内核半径における地球ダイナモに対する温度勾配に関する境界条件の効果について

# 西田 有輝 [1]; 加藤 雄人 [2]; 松井 宏晃 [3]; 松島 政貴 [4]; 熊本 篤志 [5]

[1] 東北大・理・地球物理; [2] 東北大・理・地球物理; [3] UC Davis EPS; [4] 東工大・地惑; [5] 東北大・理・地球物理

## Effect of boundary condition of temperature gradient on geodynamo with various inner core size

# Yuki Nishida[1]; Yuto Katoh[2]; Hiroaki Matsui[3]; Masaki Matsushima[4]; Atsushi Kumamoto[5]

[1] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ; [2] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [3] UC Davis EPS; [4] Dept Earth &amp; Planetary Sciences, Tokyo Tech; [5] Dept. Geophys, Tohoku Univ.

The Earth has sustained its intrinsic magnetic field for at least 3.5 billion years as revealed by paleomagnetic studies [e.g., Biggin et al., 2015]. The geomagnetic field has been sustained by dynamo action due to convection of liquid iron alloy in the outer core. Studies of the thermochemical evolution of the Earth's core suggest that the solid inner core has been growing up for approximately one billion years [e.g., O'Rourke and Stevenson, 2016]. Consequently, Heat flow in the core has also been changing for the Earth's history [e.g., Driscoll and Bercovici, 2014]. Driving force of dynamo is buoyancy force by temperature gradient larger than adiabatic reduction effect. Hence it is important to investigate dynamo condition on heat flux with various inner core size to understand environment of the past Earth. There are some numerical dynamo simulations focusing on the various inner core size. Heimpel et al. (2005) evaluated dynamo onset conditions with different inner core size for fixed temperature boundary. Horii et al. (2010) found that sustained magnetic field is likely to be more dipolar on the fixed heat flux condition than on the fixed temperature condition with two different inner core size cases. For considering a thermal evolution model, sustained magnetic field is dipolar for recent 0.6 billion years [Driscoll, 2016]. Lhuillier et al. (2019) points out that sustained magnetic field is less dipolar when the ratio of the inner to outer core radii  $r_i/r_o$  is 0.2 to 0.22. However, it is still unclear that the mechanisms of controlling factors of dipolar or non-dipolar regime are related with different inner core size.

In the present study, we investigate the effects of the thermal boundary conditions on numerical dynamos with various inner core size. First, we perform dynamo simulations with various inner core radii on temperature fixed at the inner core boundary (ICB) and at the core-mantle boundary (CMB) using a numerical dynamo code Calypso [Matsui et al., 2014]. We investigate the characteristics of the generated magnetic field following Heimpel et al. (2005) and survey the wide range of parameter. We fix the Ekman, Prandtl, and magnetic Prandtl numbers to be  $E = 10^{-3}$ ,  $Pr = 1$ , and  $Pm = 5$ , respectively, and change the Rayleigh number ( $Ra$ ) and the ratio of inner to outer core radii to be  $r_i/r_o = 0.15, 0.25$ , and  $0.35$ . Examining the dominance of the dipole component, we found non-dipolar components become larger for the smaller inner core. Second, we perform simulations with fixed heat flux boundary, incoming flux at the ICB and outgoing flux at the CMB. The Ekman, Prandtl, and magnetic Prandtl numbers are set the same as the fixed temperature boundary condition. In order to compare results between fixed temperature and fixed heat flux boundary conditions, we calculate the temperature gradient in fixed temperature cases and set the same gradient in fixed heat flux simulations. Here the Rayleigh number at the onset of thermal convection is called the critical Rayleigh number ( $Ra_{crit}$ ). Especially in  $r_i/r_o = 0.25$ , the ratio of temperature gradient at ICB and CMB is  $4.18/0.268$  at  $Ra/Ra_{crit} = 1.11$  and  $4.06/0.255$  at  $Ra/Ra_{crit} = 1.04$ . At closer  $Ra$  to  $Ra_{crit}$ , the ratio becomes  $4/0.25$ . This is inverse of area ratio of ICB and CMB, so in this setting heat flow is balanced in the outer core.  $Ra_{fcrit}$  with heat flux is  $1.1 \times 10^4$ . To investigate effects of the thermal boundary condition on numerical dynamos, we need to carry out further numerical simulations with balanced heat flow in the outer core so as to occur convection with the same temperature difference as the fixed temperature condition as possible. We will also discuss simulation results with in  $r_i/r_o = 0.15$  and  $0.35$ .

地球は少なくとも 35 億年間、固有磁場を維持してきたことが古地磁気研究から明らかとなっている [e.g., Biggin et al., 2015]。地球磁場は外核中の流体鉄の対流によるダイナモ作用によって維持されている。固体の内核は約 10 億年かけて成長してきたと熱化学進化研究から考えられている [e.g., O'Rourke and Stevenson, 2016]。同時にコアの熱流量についても地球の歴史から見ると変化してきた [e.g., Driscoll and Bercovici, 2014]。ダイナモの駆動力は断熱減率効果より大きな温度勾配から生じる浮力である。ゆえに過去の地球環境を理解するために異なる内核サイズにおける熱フラックスに対するダイナモ条件を調査することは重要である。内核サイズに着目した数値ダイナモ研究はこれまでにいくつか報告されている。Heimpel et al. (2005) は温度固定境界において複数の異なる内核サイズに対するダイナモ onset 条件を評価した。Hori et al. (2010) はふたつの異なる内核サイズについて、温度固定より熱フラックス固定を与えた場合の方が維持される磁場が dipole 卓越型になりやすいことを明らかにした。熱進化モデルを考慮すると最近 6 億年は維持される磁場が dipole 卓越型になるという研究がある [Driscoll, 2016]。Lhuillier et al. (2019) は外核内核半径比が  $r_i/r_o = 0.2 - 0.22$  において維持される磁場は less dipole 型になると指摘している。しかしながら、維持される磁場が dipole 型になるか non-dipole 型になるかを決定するメカニズムが内核サイズとどう関係しているかはまだ十分理解されていない。

本研究では、異なる内核サイズにおいて数値ダイナモにおける熱的境界条件の効果について調査した。数値ダイナモコード Calypso [Matsui et al., 2014] を使用して、異なる内核半径の場合にまずは内核境界 (ICB) とコア-マントル境界 (CMB) で温度固定とする条件を与えてダイナモ計算を実施した。Heimpel et al. (2005) に従って、維持される磁場の構造を広い

パラメータ範囲で検討した。エクマン数 $E$ 、プラントル数 $Pr$ 、磁気プラントル数 $Pm$ をそれぞれ $E = 10^{-3}$ ,  $Pr = 1$ ,  $Pm = 5$ と固定し、半径比を $r_i/r_o = 0.15, 0.25, 0.35$ と3通り変化させた場合にそれぞれレイリー数 $Ra$ を変化させた。双極子成分の卓越性の解析から、内核が小さい場合には非双極子成分が大きくなることが明らかとなった。次に、ICBから熱が入ってきてCMBで熱が逃げていく向きに熱フラックスを固定したシミュレーションを行った。エクマン数、プラントル数、磁気プラントル数はそれぞれ温度固定境界での計算と同じ数値を設定した。温度固定と熱フラックス固定でのシミュレーション結果を比較するため、温度固定での計算で温度勾配を計算してその勾配を用いて熱フラックス計算を実施した。ここで熱対流のonsetを表すレイリー数を臨界レイリー数 $Ra_{crit}$ と言う。半径比 $r_i/r_o = 0.25$ の場合、 $Ra/Ra_{crit} = 1.11$ の例ではICBとCMBでの温度勾配の比は $4.18 : 0.268$ ,  $Ra/Ra_{crit} = 1.041$ の例では $4.06 : 0.255$ であった。 $Ra$ が $Ra_{crit}$ に近づくに連れて勾配の比が $4:0.25$ に近づくことが確認された。この比はICBとCMBの面積比の逆比であるから、この設定では外核中の熱流量はバランスする。熱フラックスにおける臨界レイリー数を算出すると $Ra_{fcrit} = 1.1 \times 10^4$ となった。数値ダイナモにおける熱的境界条件の効果を調査するため、外核中の熱流量がバランスするような数値シミュレーションをより多く行い、できる限り温度固定の計算と同じ温度差が実現される対流を起こすようにする。また半径比が $r_i/r_o = 0.15, 0.35$ の場合のシミュレーション結果も議論していく。