

数値シミュレーションに基づく内核半径の変化が臨界レイリー数付近での回転球殻対流に与える影響についての研究

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

Influences of inner core radius on thermal convection in a rotating spherical shell near the critical Rayleigh number

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 & Planetary Sciences, Tokyo Tech; [5] Dept. Geophys, Tohoku Univ.

Instinct geomagnetic field is thought to be sustained by a dynamo action of fluid iron alloy convection in the outer core. Recent studies suggest that the solid inner core was nucleated about 1 billion years ago and after that it has grown to the present size from thermochemical calculations [e.g., O'Rourke and Stevenson, 2016]. There is a probability that change of the convective-region geometry influenced on the outer core convection, but geodynamo has sustained over 3.5 billion years from paleomagnetic analyses [e.g., Biggin et al., 2015]. It is important to reveal properties of dynamo in a rotating spherical shell corresponding to the past Earth in the perspective of understanding magnetohydrodynamics and elucidating the environment of the past Earth. Because there are a few studies, in which Heimpel et al. (2005) discussed dynamo onset in the various inner core radii, geodynamo different from the current inner core size has not been fully understood. In the present study, using a numerical dynamo code Calypso [Matsui et al., 2014], we carried out non-magnetic thermal and dynamo simulations in three different aspect ratios: $r_i/r_o = 0.15, 0.25,$ and 0.35 (the present value), where r_i and r_o are the inner core and outer core radii, respectively. In order to quantify a convection structure, we calculated a length scale of flow in azimuthal direction [cf. King and Buffett, 2013]. As a result, it is revealed that in both cases of $r_i/r_o = 0.25$ and 0.35 , the dominant length scale in MHD cases is the same as that in non-magnetic cases in the range of Rayleigh number where dynamo is not sustained, $1.0 Ra_{crit} < Ra < 1.9 Ra_{crit}$ in $r_i/r_o = 0.25$ and $1.0 Ra_{crit} < Ra < 1.3 Ra_{crit}$ in $r_i/r_o = 0.35$. Ra is the Rayleigh number and Ra_{crit} is the critical Rayleigh number. It is also found that the scale of structure in non-magnetic cases gets larger than that in the Ra range of non-sustained dynamo cases, but that in MHD cases is comparable to non-sustained dynamo cases in the range of Rayleigh number where dynamo start to be sustained, in both cases of aspect ratios, $2.2 Ra_{crit} < Ra < 2.8 Ra_{crit}$ in $r_i/r_o = 0.25$ and $1.5 Ra_{crit} < Ra < 2.0 Ra_{crit}$ in $r_i/r_o = 0.35$. It is specifically shown that the dominant mode in thermal convection is changed from $m = 2$ to $m = 1$ in $r_i/r_o = 0.25$ and from $m = 4$ to $m = 3$ in $r_i/r_o = 0.35$ with Ra increasing. On the other hand, it is also shown that the dominant mode in dynamo cases convection remains for $m = 2$ in $r_i/r_o = 0.25$ and $m = 4$ in $r_i/r_o = 0.35$. These results show that the mode of maximum growth rate depends on Ra and initial magnetic field. In order to understand the structure of convection, it is needed to investigate what modes are easy to grow. It is known that the critical Rayleigh number in a rotating spherical shell is a function of the spherical harmonic degree, the aspect ratio, and the Ekman number [e.g., Bissshop, 1958; Chandrasekhar, 1961; Roberts, 1968; Busse, 1970]. We also compare the results of our simulations in thermal convection with these studies.

地球の固有磁場は外核における鉄流体の対流によるダイナモ作用によって維持されていると考えられている。外核の大きさは地質学的年代で見ると変化してきた。すなわち、約 10 億年前以前には内核が存在しなかったのが約 10 億年前に内核が形成され、その後現在まで成長してきたと熱進化モデル計算から議論されている [e.g., O'Rourke and Stevenson, 2016]。ジオメトリの変化はその年代ごとに外核対流が変化してきた可能性を示すが、地球ダイナモは過去約 35 億年間維持されてきたことが古地磁気解析から明らかになっている [e.g., Biggin et al., 2015]。内核が現在より小さい、過去の地球に対応する回転球殻中のダイナモの性質を明らかにすることは過去環境の解明の上でも磁気流体力学的にも重要である。しかしながら、ダイナモ発生条件について考察した Heimpel et al.(2005) などはあるものの十分研究が進んでいない。そこで我々は、数値ダイナモコード Calypso[Matsui et al., 2014] を使用して 3 通りの異なる外核 (r_o) 内核 (r_i) 半径比、つまり $r_i/r_o = 0.15, 0.25, 0.35$ (現在) において磁場なし熱対流計算とダイナモ計算を実施した。実現される対流構造を把握するために、King and Buffett (2013) を参考に経度方向の流れの典型的なスケールを計算した結果、 $r_i/r_o = 0.25$ では $1.0 Ra_{crit} < Ra < 1.9 Ra_{crit}$ において、また $r_i/r_o = 0.35$ では $1.0 Ra_{crit} < Ra < 1.3 Ra_{crit}$ において、つまり $r_i/r_o = 0.25, 0.35$ のいずれの場合にもダイナモが維持されない程の小さいレイリー数 (Ra) では磁場なし熱対流も MHD 計算もスケールは変わらないことが示された。ここで、 Ra_{crit} は臨界レイリー数を表す。さらに、 Ra を徐々に増加させダイナモが生じ始める条件付近、すなわち $r_i/r_o = 0.25$ では $2.2 Ra_{crit} < Ra < 2.8 Ra_{crit}$ において、 $r_i/r_o = 0.35$ では $1.5 Ra_{crit} < Ra < 2.0 Ra_{crit}$ においてスケールを計算した結果からは、いずれの外核内核半径比でも熱対流の構造が Ra の小さい条件での計算結果に比べて大きくなる一方で、MHD 計算での構造は大きな変化は認められないことが示された。すなわち、 $r_i/r_o = 0.25$ の場合には熱対流の支配的なモードが Ra の変化に伴い $m=2$ から $m=1$ へ、 $r_i/r_o = 0.35$ の場合には $m=4$ から $m=3$ へと変化する一方で、MHD 計算では、いずれの Ra においても支配的なモードが $r_i/r_o = 0.25$ の場合には $m=2$ 、 $r_i/r_o = 0.35$ の場合には $m=4$ となることが示された。以上の結果は熱対流において成長率が最大となるモードが Ra の増加に伴い変化したことを示しており、どういった状況でどのモードが成長しやすいかを調べるのが、実現される対流の様子を理解する上で重要である。そこで本研究では、線形項のみを考慮した熱対流シミュレーションを実施して比較することにより、最大成長モードの Ra 依存

性について考察する。過去の研究では、回転球殻熱対流において臨界レイリー数は球面調和関数の次数と内核外核半径比、エクマン数の関数になることが示されており [e.g., Bisshop, 1958; Chandrasekhar, 1961; Roberts, 1968; Busse, 1970]、これを参考に磁場なし熱対流の場合に得られている我々のシミュレーション結果を比較検討する。さらに、磁場なし熱対流とダイナモのシミュレーション結果を比較することにより、対流に与える磁場の影響についても考察する。