

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24840017

研究課題名(和文) 現在および古代の地球型惑星ダイナモにおける CMB 熱的不均質構造の影響の解明

研究課題名(英文) Influence of core-mantle boundary heat flows on the present and ancient dynamos of terrestrial planets

研究代表者

堀 久美子 (Hori, Kumiko)

東京大学・地震研究所・特任研究員

研究者番号：30636858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000 円、(間接経費) 630,000 円

研究成果の概要(和文)：磁気流体力学的ダイナモおよび回転磁気対流に関する数値実験により、以下を明らかにした。(1) 内核成長が始まる前の古代期の地球および火星ダイナモでは、コア・マントル境界(以下、CMB)における熱的水平不均質構造がより強い影響をもっていた。(2) 内核成長が進行している現在の地球コアでは、CMB水平不均質構造が固体内核表面の構造に及ぼす影響は、先行研究で考えられていたほど大きくなりえない。(3) CMB不均質構造と内核表面構造との水平位置関係は、磁場強度および対流の発達度によって異なる。ただし、現在の地球コアのように活発な対流運動が起こっている場合、両者の位置関係はほぼ一致すると考えてよい。

研究成果の概要(英文)：I performed numerical experiments of self-consistent magnetohydrodynamic dynamos and magnetoconvection in rotating spherical shells. The implications are: (1) when solid inner cores did not start to grow, such as the ancient Earth and Mars, a smaller lateral heat-flux variation at the core-mantle boundaries (CMB) leads to boundary-induced structures and different field strengths. (2) The effect is much smaller for dynamos with an inner core being growing, e.g. the present Earth's core, and the impacts on the lateral variations at the inner core boundary (ICB) cannot be as large as a former study proposed. (3) The lateral phase relationship between CMB and ICB heterogeneities varies on the strengths of a background magnetic field and buoyancy. However, it becomes identical as convection is sufficiently vigorous, like in the present Earth's core.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：固体地球惑星物理学

キーワード：地球ダイナモ 火星ダイナモ 内核成長 永年冷却 コア・マントル相互作用 古地磁気学 国際情報交換

1. 研究開始当初の背景

(1) 古代地球および火星のダイナモ

近年の古地磁気研究により、古代地球磁場の強度や空間構造が現在のものと異なっていた可能性が指摘されている。このような議論の際に度々あげられるのが、固体内核の成長によるダイナモの影響である。しかしながら、近年の数値ダイナモシミュレーションからはその影響は弱かっただろうと示されてきており (Aubert et al. 2009)、未だ混沌とした状況にある。

一方、火星においては、NASA 探査機 Mars Global Surveyor の観測により、極めて強い南北非対称性をもつ地殻残留磁化があることが明らかになった。その成因の一つに、古代ダイナモにその起因を求める説がある (Stanley et al. 2008; Amit et al. 2011)。古代火星において、マントル対流によりコア・マントル境界 (以下、CMB) に熱的水平不均質構造が形成され、それによって強制されたダイナモ作用が南北非対称な磁場を生成し、そこで地殻残留磁化として獲得され現在まで保存されている、というものである。しかし、先行研究においては、このような非対称な磁場がどの程度容易に生成され得るかという問題点が残っていた。

このような二つ問題に対して、私たちは、CMB 熱的水平不均質構造の影響が、古代ダイナモと現在の地球ダイナモとは異なるだろうことに注目した。現在の地球では、コア半径の約 1/3 に固体金属からなる内核が存在するが、これは地球形成時から冷却によって約 10-20 億年前から析出・成長を続けてきたもので、それ以前の古代期には固体内核は存在せず、コア全球が液体金属から成っていたと考えられる。また、火星では、コアダイナモが駆動されていたのは火星形成後の約 5 億年間と考えられているが、そこでは古代地球と同様に固体内核が存在しないコアだったということが、熱史計算により示唆されている。

現在の地球のように内核の固化が進行しているときは、内核成長に伴って内核・外核境界 (以下、ICB) から放出される潜熱や軽元素がコア対流の主な駆動源となるのに対し (以下、内核成長駆動型)、古代地球や火星のように内核成長が進んでいないときには、コア全球での永年的な冷却がコア対流の主な駆動源となる (以下、永年冷却駆動型)。この駆動源の違いは、コア内の浮力分布に差異をもたらすため、コア対流の構造とそのダイナモ作用、そして生成される磁場構造にも影響を及ぼしうる。私たちはこれまで、この二つの対流・ダイナモの性質の差異を、水平一様な CMB 熱的境界条件を仮定した場合で調べてきた (Hori et al. 2010, 2012)。その結果、永年冷却型の対流・ダイナモでは、CMB 熱

的境界条件によって空間構造が変化することがわかってきた。

(2) 現在の地球ダイナモ

この駆動源の違いは、上述のような古代地球型惑星を考える場合だけでなく、現在の地球ダイナモを考える上でも重要である。現在の地球ダイナモへの応用を想定した磁気流体力学的 (以下、MHD) ダイナモシミュレーションは過去約 20 年でさかんに行われてきたが、そこでは駆動源の違いがシミュレーション結果にもたらす影響にあまり注意を払われてこなかったためである。

例えば、近年さかんに議論されている課題の一つに、現在の固体内核における東西半球での非対称構造がある。その成因として、CMB 熱的水平不均質構造がコア内の対流構造を規定し、ICB および固体内核に水平不均質性を形成しているという説が提唱された (Gubbins et al. 2011)。しかし、その根拠となった数値計算では、永年冷却型のダイナモモデルが仮定されており、内核成長に伴う潜熱と軽元素の放出が主な駆動源となっているであろう現在の地球コアを議論する際には、CMB 熱的水平不均質構造の影響を過大評価してしまう可能性がある。

さらに、この説のもう一つの問題点は、CMB 熱的水平不均質構造が、どの程度、ICB および固体内核の水平不均質構造として反映されるか明らかでないという点である。地球の自転や強磁場の影響が無視できる場合には、CMB から流出する熱フラックスが大きい領域の直下でコア深部に向かって下降流が形成され、内核表面まで達すると考えることもできる。しかし、地球コア内のように、自転や強磁場の影響が無視できない場合には、それら効果の兼ね合いにより、この CMB 不均質構造とコア対流の下降流の位置に東西方向へのずれがおりうる。過去の線形解析から示されている (Zhang & Gubbins 1992; Yoshida & Hamano 1993)。したがって、CMB 不均質構造と内核表面の不均質構造との関係もそれほど単純でない可能性がある。

2. 研究の目的

(1)

古代地球および火星コアにおけるダイナモでは、CMB における熱的境界条件がより大きな影響をもっていたかどうかを検証する。私たちのこれまでの研究を発展させ、CMB に熱的水平不均質性が存在する場合にも成り立つものかどうかを精査する。

(2)

現在の地球コアダイナモにおいて、CMB 熱的水平不均質構造が ICB または内核表面の熱的構造に及ぼす影響を再検討する。

永年冷却型モデルと内核成長駆動型モデルでその結果にどの程度の差異が生じうるかを明らかにする。

CMB 不均質構造とそれによって生じる ICB 不均質構造との東西方向への位置関係を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)

CMB における熱的水平不均質構造として様々な水平空間構造を仮定し、MHD ダイナモ数値シミュレーションを系統的に行う。同じ CMB 構造に対するコア内の流れおよび磁場の応答を、永年冷却駆動型ダイナモの場合と内核成長駆動型ダイナモの場合とで比較する。CMB 水平空間構造として仮定したのは、南北半球に反対称で東西方向には一様な構造、南北対称で東西方向に波数 1 または 2 で表現される構造である。それぞれの CMB 水平不均質構造の場合で、いくつかの物理量をとることで定量的に解析する。コア内の流れ構造の変化を特徴づけるためには運動エネルギーにおける空間スペクトルを、磁場強度および構造のためには磁場エネルギーおよび軸双極子成分がもつ相対磁気エネルギーを用い、その変化率を永年冷却駆動型ダイナモと内核成長駆動型ダイナモとで比較を行う。

(2)

方法(1)の数値シミュレーションにおいて、特に CMB 熱的水平不均質構造が南北対称で東西波数 2 と与えられた場合を精査する。内核表面または ICB から放出される熱フラックス量およびその水平分布を計算し、永年冷却駆動型ダイナモと内核成長駆動型ダイナモとでどの程度差異をもたらすのか評価する。

CMB 熱的水平不均質構造が ICB または固体内核の熱的構造に及ぼす影響を明らかにするために、コア対流を模倣し、強磁場下における対流（以下、磁気対流）の数値実験を行う。磁気対流の数値実験では、背景磁場を外的に与えることにより、その背景磁場の強さが対流に及ぼす影響を詳細に調べることができる。今回は特に、自転や強磁場の存在によって、対流構造がどのように変化するか、また、CMB と ICB の水平不均質構造の位置関係がどのように変化するかという点に注目し、系統的な調査を行う。

4. 研究成果

(1)

古代地球および火星コアにおけるダイナモでは、CMB 熱的水平不均質構造がコア対流やダイナモに対してより大きな影響力をもっていたことがわかった。図 1 は、CMB に南北対称で東西波数 2 の熱フラックス分布が与えられた場合のコア内部の対流構造とコア表面での磁場構造を、同じパラメータで両ダイナモモデルを比較したものである。永年冷却型モデルでは CMB より強制された東西波数 2 の構造が確認できるのに対し、内核成長駆動型モデルではこの効果は明瞭でない。この応答の敏感さを定量的に比べるために、図 2 では、運動エネルギーにおける空間スペクトルの変化、磁場強度の変化を、CMB 不均質構造の強度の関数として示した。その変化率を比較すると、永年冷却型ダイナモの方が CMB 不均質構造に対する変化率が大きいことがわかる。これは、古代地球または火星のダイナモが、現在の地球ダイナモよりも、CMB 熱的不均質構造に対してより敏感に反応することを意味する。

本成果は、先行研究と異なり、コア表面に熱的不均質構造がある場合には、内核成長の有無により磁場に違いが現れうることを示すものである。つまり、古地磁気学的データにおいて、そのデータのばらつきを通して内核成長の開始時期を推定できる可能性があることを示唆する。単純には、内核成長の開始前には古地磁気データのばらつきが大きく、内核成長の開始後にはそのばらつきが小さくなることが予想される。今後、古地磁気データによる検証が必要である。

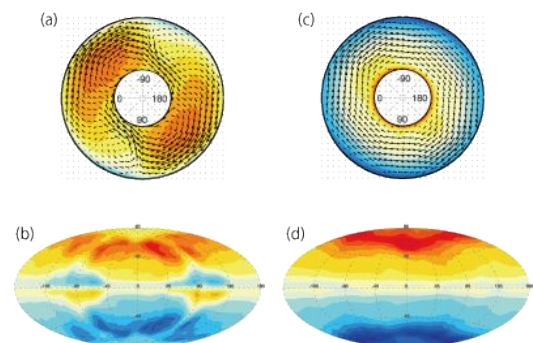


図 1 東西波数 2 の CMB 熱的不均質構造が与えられたときの永年冷却駆動型 (a,b) と内核成長駆動型のダイナモ (c,d) の比較。(a,c) 赤道面における温度場と速度ベクトルと (b,d) CMB における磁場の半径方向成分。

Hori et al. (Planet. Space Sci. in press) より引用。

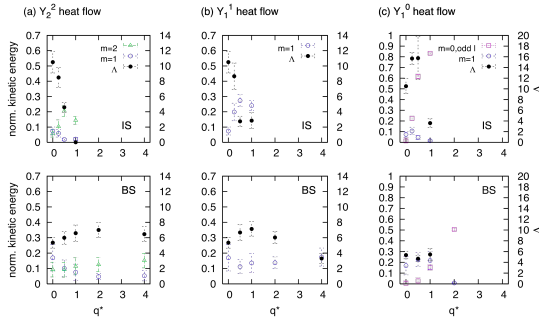


図2 CMB 熱的不均質性の強さ q^* に対する相対運動エネルギー (色つき印、左の縦軸) と磁場強度 (黒丸、右の縦軸) の変化。永年冷却駆動型ダイナモ (上段) と内核成長駆動型ダイナモ (下段) の比較。CMB 熱的不均質構造が (a) 南北対称で東西波数 2、(b) 東西波数 1、そして、(c) 南北反対称で東西方向に一樣なとき。Hori et al. (Planet. Space Sci. in press) より引用。

(2)

ICB または内核表面の熱的構造に關していうと、永年冷却駆動型ダイナモでは、内核成長駆動型ダイナモに比べて CMB 不均質構造の ICB 構造への影響が過大評価されることがわかった。図 3 は、同じパラメータかつ同じ CMB 不均質構造を用い、両ダイナモモデルより得られた内核表面での熱フラックス分布を比較したものである。永年冷却型モデルでは CMB における東西波数 2 の構造が反映された熱フラックス分布が内核表面でも形成されるのに対し、内核成長駆動型モデルでは顕著でない。

この結果は、先行研究の数値計算 (Gubbins et al. 2011) が現在の地球コアに適用するには不適切であり、固体内核における東西非対称構造の成因を CMB 熱的水平不均質構造に求めることは難しいということの意味する。

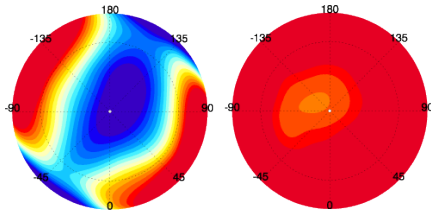


図3 東西波数 2 の CMB 熱的不均質構造が与えられたときの内核表面における熱フラックス分布を北極側から見たもの。永年冷却駆動型 (左) と内核成長駆動型 (右) のダイナモモデルの場合。

南北対称で東西波数 2 の構造の CMB 熱的水平不均質がある場合の磁気対流のふるまいを調査した結果、背景磁場の強度と対流の発達度とによって、コア対流や ICB 構造に及ぼす影響が変化することがわかった。

まず、非磁場下の対流の場合において、対流の発達度によって CMB 熱的不均質の影響が大きく変化することがわかった。対流の発達度が弱いときには、CMB から流出する熱フラックスが最大値をとる位置とコア対流の下降流の位置とで東西方向にずれが起こる (図 4a)。これは、自転の効果でコリオリ力が卓越することによって現れる性質で、過去の線形解析や数値計算と整合的である (Zhang & Gubbins 1992; Yoshida & Hamano 1993)。しかし、対流の発達度が強くなるにつれ、CMB 不均質構造とコア対流の下降流の位置とが再び一致するようになることが、今回わかった (図 4b)。これは前述の線形論だけでは理解できなくなることを意味している。

一方、強磁場が存在する場合には、それほど対流の活動度によらず、コア対流の下降流と CMB 不均質構造との位置関係は概ね一致するようになる (図 4c-d)。強磁場の存在によりローレンツ力とコリオリ力が釣り合えるようになるため、コア対流の下降流と CMB 不均質構造との位置のずれが解消され、磁場の効果も自転の効果もない場合の対流構造、つまり、両者間の位相関係は一致するような構造が再び形成される (Yoshida & Hamano 1993)。

これらの結果は、対流の活動度が極めて高い状況にあると考えられる現在の地球コアでは、CMB 水平不均質構造と内核表面の不均質構造の位置関係はほぼ一致すると考えてよいということの意味する。一方、将来の地球のように、コア対流の活動が弱くなった場合には、背景磁場強度によってはこの両者に位相のずれが起こりうることを示唆される。

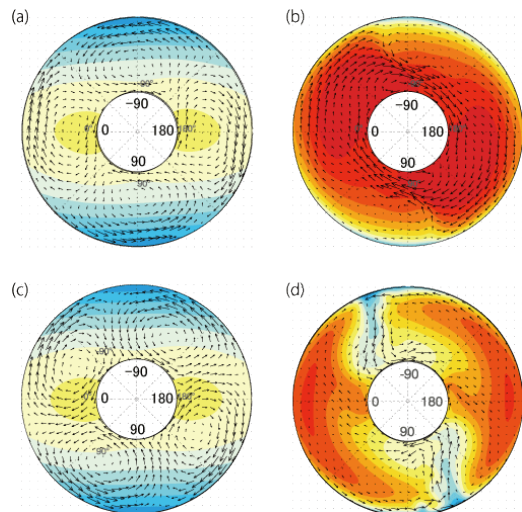


図4 東西波数 2 の CMB 熱的不均質構造が与えられたときの非磁場下の対流 (a,b) と磁気対流 (c,d)。赤道面における温度場と速度ベクトルを図示。CMB から流出する熱フラックスは経度 $\pm 90^\circ$ で最も大きく、自転の効果がない場合にはこの直下に下降流が形成される。対流の活動度が弱いとき (a,c) と強いとき (b,d)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

- ・ K. Hori, J. Wicht, W. Dietrich, Ancient dynamos of terrestrial planets more sensitive to core-mantle boundary heat flows, Planetary and Space Science, 査読有, DOI: 10.1016/j.pss.2013.04.007.
- ・ K. Hori, J. Wicht, Subcritical dynamos in the early Mars' core: implications for cessation of the past Martian dynamo, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 査読有, Vol. 219, June 2013, pp.21-33.

[学会発表](計 5件)

- ・ Kumiko Hori, Shin-ichi Takehiro, Hisayoshi Shimizu, Waves and linear stability of magnetoconvection in a rotating cylindrical annulus, RIMS Internal Conferences on Zonal Flows in Geophysical and Astrophysical Fluids, 日本・京都, 2013年11月6-8日.
- ・ Kumiko Hori, Chris Jones, Johannes Wicht, Shin-ichi Takehiro, Hisayoshi Shimizu, Rotating magnetohydrodynamic waves in convection-driven dynamos: implications for geomagnetic secular variation, 日本・葉山, 2013年9月27-29日.
- ・ Kumiko Hori, Johannes Wicht, Subcritical dynamos in the early Mars' core: implications for cessation of the past Martian dynamo, Mathematical Aspects of Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, フランス・Cargese, 2013年7月27日.
- ・ Kumiko Hori, Johannes Wicht, Wieland Dietrich, Ulrich Christensen, Influence of thermal boundary conditions on convection and dynamos in early and present Earth-like cores, American Geophysical Union 2012 fall meeting, アメリカ・San Francisco, 2012年12月3日.
- ・ 堀久美子, Johannes Wicht, 初期火星コアにおける亜臨界的ダイナモ, 第132回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 札幌・コンベンションセンター, 2012年10月23日.

6. 研究組織

(1)研究代表者

堀久美子 (HORI, Kumiko)
東京大学・地震研究所・特任研究員
研究者番号: 30636858

(2)協力研究者

Johannes Wicht
マックスプランク太陽系科学研究所・上級研究員

Wieland Dietrich
マックスプランク太陽系科学研究所・大学院生
ゲッティンゲン大学・地球物理学研究所・大学院生