

巨大内核を持つ惑星ダイナモシミュレーション

課題責任者

宮腰 剛広 海洋研究開発機構 地球深部ダイナミクス研究分野

著者

宮腰 剛広 海洋研究開発機構 地球深部ダイナミクス研究分野
陰山 聡 神戸大学大学院 システム情報学研究科 計算科学専攻

本プロジェクトでは新たに開発された、内核内の磁場の時間変化も解く事が可能な Yin-Yang-Zhong ダイナモシミュレーションコードを用いて、巨大な内核（全コア半径の 90%）を持つ惑星ダイナモの研究に取り組んだ。内核は惑星内部の冷却に伴い成長しているため、これは地球のコアの未来の状態と言える。また水星のようなサイズの小さな惑星や、古くに誕生した系外惑星などでは冷却が進んでおりこのような巨大な内核を持っている可能性があり、そのような惑星のダイナモ過程についての知見を得る事も目標としている。地球のコアのようなそれほど大きくない内核を持つ場合、内核の南北領域（Tangential Cylinder、以下 TC と略記）内ではほとんど対流が生じず、TC 外では自転軸にそってほとんど変化しない対流構造が見られる。計算の結果、巨大内核を持つ場合は、TC 外ばかりではなく TC 内にも活発な対流が生じる事が分かった。TC 内では TC 外と異なり、細かい粒状の対流が生じる。TC 外ではほぼ南北に細長く伸びた対流構造が得られたが、厚い外核球殻の場合に見られる対流柱のような構造とは少し異なり、（特に高レイリー数の場合）より細かく分かれた構造が得られた。磁場の動径方向成分の分布もこれらの対流構造を反映して、TC 内と外で異なる構造が見られる事が分かった。

キーワード：惑星ダイナモ、惑星磁場、内核、対流、Yin-Yang-Zhong 格子

1. 背景

地球の磁場（地磁気）は、日常生活ではあまり意識する事のない存在であるが、地球の表層環境や生命にも影響を及ぼしている。それは宇宙から飛来する高エネルギー荷電粒子から地球を防御する一種のバリアの役割を果たしており、また超音速で吹き付ける太陽風の直撃を防いでいるからである。JAMSTEC 長期ビジョンでは、「地球が生命に満ちあふれた希有な惑星となった謎」について取り上げられているが、地磁気の起源や変動のメカニズムを理解する事は、この謎の解明に挑むために必要となるパーツの一つであるとも考えられる。

地球内部のマントル層（岩石）のさらに深部には、核（コア）と呼ばれる主に金属（鉄）から成る構造が存在する。そこは鉄が磁石となる性質を持ちうる温度（キュリー温度）をはるかに超えているため、地球内部に永久磁石が埋まっっていてそれが地磁気を生み出しているという可能性は無い。核はさらに、外核（流体鉄）と内核（固体鉄）の二層構造に分かれている。磁場中を外核内の液体鉄が対流運動することにより、電磁誘導効果のため電流が生じ、それがさらに磁場を生み出す事によって地磁気が生成、維持されていると考えられている。この過程は地球ダイナモと呼ばれている。これはまた、対流の運動エネルギーが地球ダイナモ過程を通じて磁気エネルギーに変換されているという言い方も出来る。

この過程が実際にうまく働くかどうか、また働いたとして具体的にどのようなメカニズムで磁場が生成されているのか、対流と磁場の関係はどうなっているのか、どのような強さや構造の磁場が形成されるのか、と

いった事を調べるためには、電磁流体方程式（MHD、Magnetohydrodynamics）を解く必要がある。これは 8 つの独立変数を持つ非線形連立偏微分方程式であり、解析的に解く事は（余程特殊な状況を除いて）ほぼ不可能であり、数値シミュレーションが非常に有効な研究手段の一つとなっている。しかしながら地球ダイナモは本質的に 3 次元の問題であり、また核内は極端な物理状態に置かれていて、その計算には非常に大きな計算機資源を必要とする。

スーパーコンピュータの進展と併せ、地球ダイナモのシミュレーション研究は 1990 年代半ばから始まった。その後、地球外核内の物性パラメータをそのまま再現したシミュレーションはまだ不可能であるものの、ダイナモの素過程や、対流と磁場の関係、双極子磁場（地磁気の主な構造）の自発的な生成やその極性の反転の再現などを通して、ダイナモ過程の基本的な性質の理解が進んできた。現在では、マントル対流がコア対流や地磁気に与える影響を考慮するなど、さまざまな影響を考慮したシミュレーション研究も進んでいる。

このような中、近年注目を集めているものの一つが、内核の存在が地磁気に与える影響である。内核は固体鉄であり流れが存在せず、そこでは磁場は生み出されないため、地球ダイナモシミュレーションではこれまで内核にはあまり注意が払われていなかった。それは数値シミュレーションの技術上、球座標の座標特異点（ $r=0$ ）を含む内核を計算に含めるのは避けたかったという理由もある。しかしながら、内核内に染み込んだ磁場は、（特に大規模な）磁場構造を安定化させ、対流構造や極性反転のしやすさなどにも影響を及ぼす可能性がある。これらの効果

は内核の成長度合い（大きさ）が大きくなると強まると予想される。また内核の大きさは外核の厚みに影響するため、レイリー数などの対流の基本パラメータのみならず、外核内対流構造、ひいてはダイナモ過程や磁場の強さなどに影響を及ぼす可能性が高い。

我々の研究グループでは、プロジェクトメンバーの陰山聡教授（神戸大学）が開発した、「インヤン（Yin-Yang）格子」によるダイナモモデルを用いて、地球シミュレータによるダイナモシミュレーション研究の成果を発表してきた（e.g., [1-2]）。インヤン格子は、球座標において北極と南極に存在する座標特異点を回避して高効率計算を実現する。しかしながら、原点上の座標特異点については避けることができていなかった。最近、陰山教授によりインヤン格子が拡張され、 $r=0$ の原点も含めて計算することができる新しい計算格子「インヤンゾン（Yin-Yang-Zhong）格子」の開発に成功した（図1）[3]。そのため、内核内の磁場の時間発展も解く事が可能になった。

本研究の目的は完成したばかりのこのインヤンゾン格子をダイナモシミュレーションに応用し、地球を含む惑星の内核が惑星磁場の形成に与える影響を明らかにすることである。本研究ではインヤンゾン格子による最初のプロダクトランとなる課題として、内核の影響をより明瞭に見る事が出来ると期待される、内核半径がコアの全半径の9割を占めるような場合でのダイナモ問題に取り組んだ。内核は地球の冷却とともに成長し続けているので、これは未来の地球の姿と言える。また地球よりもサイズの小さな水星、もしくは近年続々と発見されている系外惑星で高年齢の惑星などでは冷却の進行によりこのような巨大内核を持っている可能性が考えられ、そのような惑星の磁場の理解にもつながる。年老いた系外惑星の場合、それらが持つ磁場の強さや構造について知見が得られれば、磁場の観点から見たそれらの惑星のハビタビリティに関してヒントが得られるのではないかと期待される。

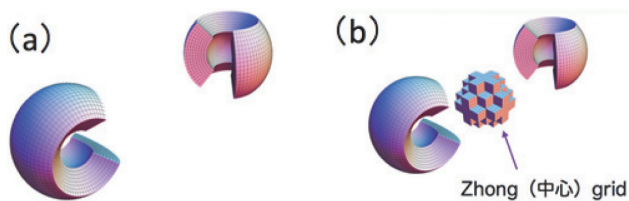


図1 (a) インヤン格子、(b) インヤンゾン格子。

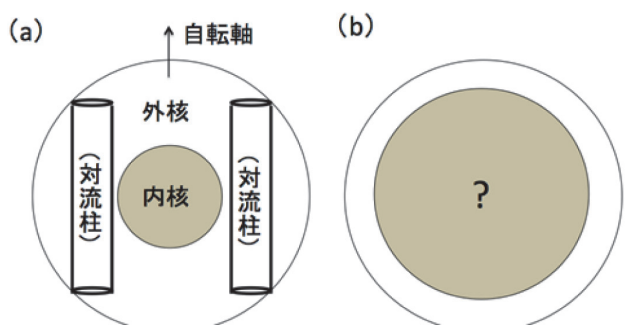


図2 (a) 厚い外核球殻（現在の地球）。(b) 薄い外核球殻。

地磁気発生メカニズムは、外核を南北方向に貫く対流柱 [4] あるいは対流シート [1] が形成される事と密接に関わっている（図2）。そして内核の南北領域（Tangential Cylinder と呼ばれる、以後 TC と略記）ではほとんど流れが存在しない。しかしながら、このような薄い外核球殻では、その形状からこれらのような大局的な柱状構造は形成し得ず、Tangential Cylinder 内の流れがどのようなものも不明である。そのため対流の素過程、およびダイナモが生じればそのメカニズムについて、新たな知見が得られる事が期待される。

2. 方法

インヤンゾン格子 [3] を用いたダイナモシミュレーションコードにより、外核内で MHD 方程式を、内核内で磁場の散逸方程式を解く。本課題ではいくつかのケースについて計算を行ったが、そのうち case (a) レイリー数 Ra （対流の活さを表す無次元パラメータ） $=3 \times 10^4$ 、エクマン数 Ek （粘性力 / コリオリ力） $=3.3 \times 10^{-3}$ 、磁気プラントル数 Pm （粘性拡散係数 / 磁気拡散係数） $=30$ 、メッシュ数 $51 \times 258 \times 770 \times 2$ （インヤン部分） $+ 906 \times 906 \times 906$ （ゾン部分）、case (b) $Ra=3 \times 10^5$ 、 $Ek=1.1 \times 10^{-3}$ 、 $Pm=10$ 、メッシュ数 $71 \times 514 \times 1538 \times 2 + 1266 \times 1266 \times 1266$ 、以上のケースについて結果を簡単に紹介する。

3. 結果

各々のケースにおける核内全体の対流運動及び磁気エネルギーの時間発展の様子を図3に示す。どちらのエネルギーも飽和レベルになるまで計算が行えている。どのケースにおいても、磁場が指数関数的に強められ、維持されている（ダイナモ過程が生じている）。

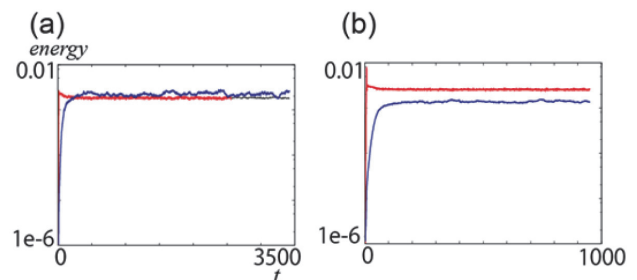


図3 パネル a は case (a)、b は case (b) のケースの、全対流運動エネルギー（赤）と全磁気エネルギー（青）の時間発展の様子。

計算時間の目安となるのが運動及び磁場の散逸時間であるが、それらはシミュレーション内の時間単位でそれぞれケース (a) では 15 及び 4591、(b) では 48 及び 4810 である。（運動散逸時間は外核の厚さで、磁場散逸時間は核の全半径を用いて評価している。）これらより本稿執筆現在、運動散逸時間よりも十分に長く計算が行えている。計算時間ステップ数はケース (a) で約 390 万ステップである。今後さらに可能な限り、磁場散逸時間に近づくまで時間積分を実施する予定である。

対流の温度場の様子を図4、図6に示す。図4は内核

–外核境界付近の球面上における温度場を赤道方向から見たものである（z軸が自転軸で、正の方向が北方向である）。これを見ると中緯度付近では、南北に伸びた縦長のセル上の構造が卓越している事が分かる。レイリー数が大きいCase Bの方が、やや薄いセルになっている。内核がコア半径の90%と非常に大きな状況でも、ある程度回転が強い（ Ek が1よりかなり小さい）と、中緯度付近ではこのように南北に伸びた構造が形成される事が分かった。ただし対流柱のような構造とは少し異なり、例えば図5（渦度の回転軸方向成分の等値面）のCase Bを見ると、南北に一樣な構造があるわけではなくより細かい構造に分割されている。Case Aではある程度南北に貫かれた構造が見られるが、おそらく球殻が非常に薄い事を反映して柱というよりも弧状の構造になっている。

図6は図4に示されている温度場を、北極方向から見たものである。これは内核が小さい（現在の地球のような）場合の結果と大きく異なり、TC内にも活発な対流が起こっている事が分かる。形状は（中緯度と異なり）粒状

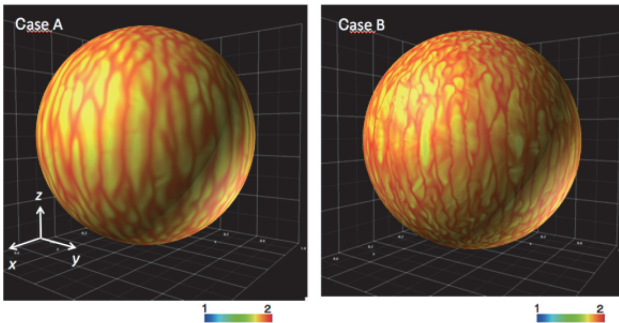


図4 外核-内核境界付近の球面上の温度場（赤道方向から見たもの）。

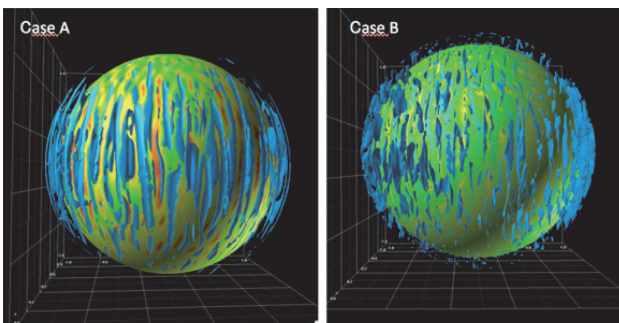


図5 渦度の回転軸方向成分の負の値の等値面（赤道方向から見たもの）。

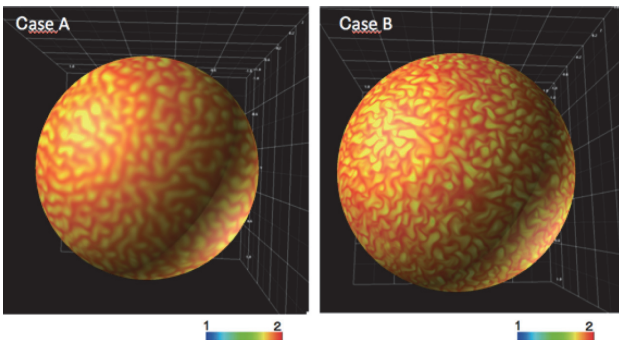


図6 図4の温度場構造を、北極方向から見たもの。

で、Case Bの方がより細かいセルの対流構造になっている。このように巨大内核を持つ場合はTC内にも、TC外とは構造が異なる、活発な対流が生じうる事が分かった。

図7および8は、コア-マントル境界上における、磁場の動径方向成分（ Br ）を見たものである。図7は赤道方向から、図8は北極方向から見たものである。対流場の構造を反映し、中緯度付近では対流セルに沿った形の磁場構造が、TC内では細かい粒状の磁場構造が見える。TC内ではCase Bの方が強い磁場が形成されている。

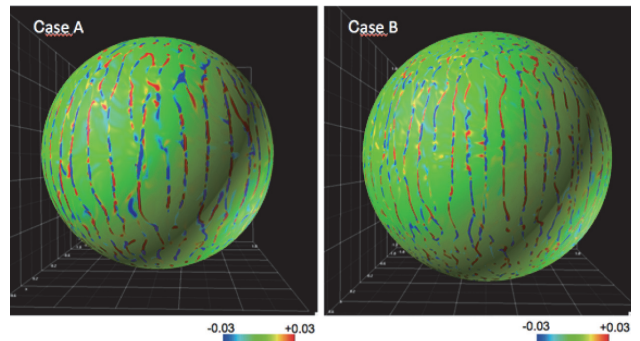


図7 コア-マントル境界上の磁場の動径方向成分（赤道方向から見たもの）。

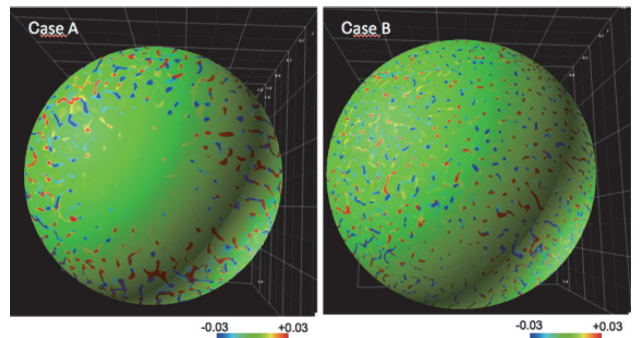


図8 図7と同様の球面を北極方向から見たもの。

4. まとめと今後の課題

巨大な（コア半径の90%）内核を持つ場合、従来の地球ダイナモモデルのような厚い外核球殻の場合と異なり、TC内にもTC外とは異なる構造を持つ、活発な対流構造が生じることが分かった。TC外（中緯度）の対流も、（特に高レイリー数では）ある程度南北方向に沿ってはいるが対流柱とは異なり細かく分裂した構造が見られる。

対流構造が中緯度と高緯度で非常に異なるため、ダイナモ過程も中緯度と高緯度それぞれで異なっている可能性がある。今後、流れ場と磁場の相互関係などを詳細に解析する事で、巨大内核を持つ場合におけるダイナモ過程がどのようなものかを明らかにしていく予定である。

また、磁場の大規模構造を議論するには、最低でも磁場散逸時間程度までの時間積分が必要になるので、今後も継続して計算を進めていく。その計算結果から、内核内も含めた磁場構造についても詳細に解析していく予定である。

文献

- [1] A. Kageyama, T. Miyagoshi, and T. Sato, *Nature*, 454, 1106-1109 (2008).
- [2] T. Miyagoshi, A. Kageyama, and T. Sato, *Nature*, 463, 793-796 (2010).
- [3] H. Hayashi, and A. Kageyama, *Journal of Computational Physics*, 305, 895-905 (2016).
- [4] A. Kageyama and T. Sato, *Phys. Rev. E.*, 55, 4617-4626 (1997).

Planetary Dynamo Simulations with Huge Inner Core

Project Representative

Takehiro Miyagoshi Department of Deep Earth Structure and Dynamics Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Takehiro Miyagoshi Department of Deep Earth Structure and Dynamics Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Akira Kageyama Graduate School of System Informatics, Kobe University

In this project, we challenged studies of planetary dynamos with huge inner core by using Yin-Yang-Zhong (YYZ) MHD (MagnetoHydroDynamics) dynamo code. The YYZ dynamo code can solve the MHD equations not only in the outer core but also in the inner core. In this study, we assume that the radius of the inner core is 90% of that of the core. The inner core size increases as the cooling in the Earth progresses, so this is the situation of the future Earth. In addition, small size planets like the Mercury, or old exoplanets may have such the large inner core. From numerical simulation results, we found that the active convection occurs not only outside the tangential cylinder (TC) but also inside the TC. The convection structure is different between them. The structure is composed of granular cells inside the TC, while that is the elongated structure with north-south direction outside the TC. The structure of the radial component of the magnetic field reflects the convection structure and is also different between inside and outside the TC.

Keywords: planetary dynamos, planetary magnetic fields, inner core, convection, Yin-Yang-Zhong grid system

1. Introduction

The geomagnetic fields protect the surface of the Earth from the solar wind or cosmic rays. So understanding of the producing and maintaining process of planetary magnetic fields will be one of the important points to understand the habitability of the planet.

The core in the Earth or terrestrial planets is composed of metal (mainly irons). The outer core is fluid, and the inner core is solid. The convection occurs in the outer core because the core is cooled by the mantle convection through the core-mantle boundary. The planetary magnetic field is produced and maintained in the outer core through MHD (magnetoHydroDynamics) dynamo process. By the process, convection energy is converted into magnetic energy.

To study the planetary dynamo process, or the relation between convection and magnetic fields, the strength or structure of magnetic fields and so on, it is necessary to solve the MHD equations. The MHD equations are non-linear simultaneous partial differential equations with eight independent variables, and analytically solving is almost impossible except for very special situations. So numerical simulations by super computers is one of the powerful tool to study the planetary dynamos. However, even by the today's super computers, numerical simulations of planetary dynamos are very difficult because the core in planets is under extreme physical situations.

In this project we focus on the role of the inner core on planetary dynamos, especially the case of huge size inner core. The inner core size increases as the cooling in the Earth

progresses, so this is the situation of the future Earth. In addition, small size planets like the Mercury, or old exoplanets may have such the large inner core. Thus, we expect that this study is useful to understand the dynamo process and magnetic fields of those planets.

Our group published research results of numerical simulations of geodynamo by using the Earth Simulator [e.g., 1-2] with Yin-Yang MHD dynamo code developed by Prof. A. Kageyama (Kobe University). The Yin-Yang MHD dynamo code can efficiently calculate the MHD equations on spherical coordinate by avoiding the singularity points on the polar axis. However, the code cannot solve the equations including the origin of coordinates. Recently, Prof. Kageyama developed the new MHD dynamo code, Yin-Yang-Zhong (YYZ) MHD dynamo code [3], which can solve MHD equations including the origin of coordinates. In this project we use this new code, which can solve the time development of magnetic fields in the inner core.

2. Models

By using the YYZ MHD dynamo code [3], MHD equations are solved in the outer core and the diffusion equation of magnetic fields is solved in the inner core. The radius of the inner core is 90% of that of the core. Here we introduce results of the two cases as follows. The case a is, the Rayleigh number $Ra=3\times 10^4$, the Ekman number $Ek=3.3\times 10^{-3}$, the magnetic Prandtl number $Pm=30$, the mesh number $51\times 258\times 770\times 2$

(Ying-Yang part)+906×906×906 (Zhong part). The case b is, $Ra=3\times 10^5$, $Ek=1.1\times 10^{-3}$, $Pm=10$, the mesh number $71\times 514\times 1538\times 2+1266\times 1266\times 1266$.

3. Results

The time development of total kinetic (red) and magnetic (blue) energy in the core is shown in Fig. 1. In both cases, both energies are saturated. The magnetic energy is exponentially strengthened and nonlinearly maintained (the dynamo process occurs).

The temperature distribution near the boundary between inner and outer core is shown in Figs. 2 and 4. In Figure 2, the structure is viewed from equatorial direction (z direction is rotation axis, and positive direction is north). In low and mid latitude, the convection cells which are elongated to north-south direction are seen. The cell scale in case b (high Ra case) is somewhat thinner than that in case a. The z component of vorticity is shown in Fig. 3 by isosurfaces (negative value isosurfaces). It is somewhat different from the convection column seen in geodynamo models [4], especially in case b. Although the structure is elongated in z direction, the structure is divided into small parts.

Figure 4 shows the same temperature distribution shown in Fig. 2 but viewed from north direction. In contrast to results of small inner core cases like the Earth, active convection occurs inside the TC (high latitude region). The convection cell size in case b is also somewhat smaller than that in case a. The convection structure is like granular cells, and is different from that in low and mid latitude shown in Fig. 2. The radial component of magnetic fields reflect the convection structure in Figs. 2 and 4, and is also different between inside and outside TC.

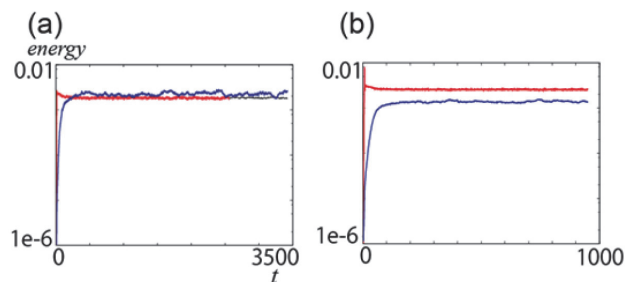


Fig. 1 The time (horizontal axis) development of total kinetic (red) and magnetic (blue) energy in the core.

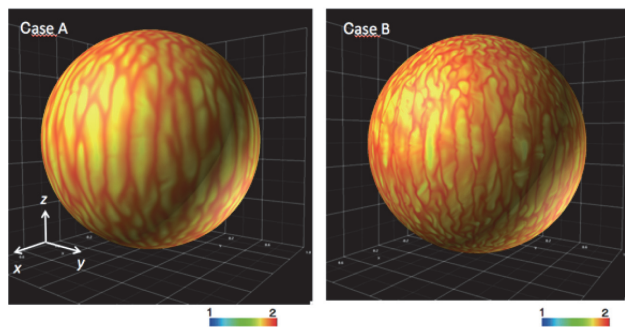


Fig. 2 The temperature distribution on the surface near the inner and outer core boundary viewed from the equatorial direction. The positive z direction is north.

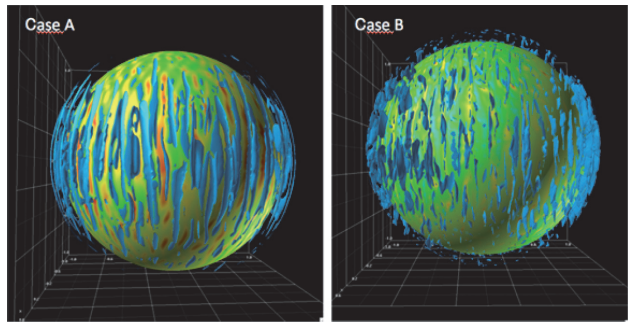


Fig. 3 The isosurface (negative value) of z component of vorticity viewed from equatorial direction.

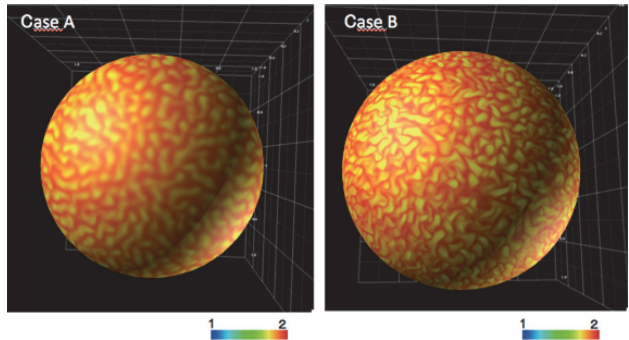


Fig. 4 The same as Fig. 2, but viewed from north.

4. Future plans

The dynamo process may be different between inside and outside TC because the convection structure between them is totally different as shown. Through detail comparisons between flow and magnetic fields, we would like to make clear the dynamo process in the case with the huge inner core.

Now the integration time is much longer than the kinetic diffusion time but shorter than the magnetic diffusion time (here the kinetic diffusion time is evaluated with the shell thickness of the outer core, and the magnetic diffusion time is evaluated with the total radius of the core). To discuss the large scale magnetic field structures, time integration which is longer than the magnetic diffusion time is necessary. We have continued the calculation to discuss the large scale magnetic field structure including the structure inside the inner core.

References

- [1] A. Kageyama, T. Miyagoshi, and T. Sato, *Nature*, 454, 1106-1109 (2008).
- [2] T. Miyagoshi, A. Kageyama, and T. Sato, *Nature*, 463, 793-796 (2010).
- [3] H. Hayashi, and A. Kageyama, *Journal of Computational Physics*, 305, 895-905 (2016).
- [4] A. Kageyama and T. Sato, *Phys. Rev. E.*, 55, 4617-4626 (1997).