

内核を取り込んだ新しい地球ダイナモシミュレーション

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)

1. 背景

地球の磁場（地磁気）の起源や変動のメカニズムを理解する事は、JAMSTEC 長期ビジョンにも取り上げられている「地球が生命に満ちあふれた希有な惑星となった謎」を解く鍵の一つであると考えられる。なぜなら、地磁気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。

地球中心部の核（コア）は、外核（液体鉄）と内核（固体鉄）の二層構造になっており、地磁気は外核内で作られている。外核の液体鉄が対流運動することにより、その流れのエネルギーを、電磁誘導効果を通じて磁場（電流）に変換することで地磁気が作られていると考えられている。ただし、その詳細な物理過程は未だ未解明である。外核の液体鉄による発電（＝ダイナモ）過程は地球ダイナモと呼ばれている。

地球ダイナモを記述する基本方程式は磁気流体（MHD, Magnetohydrodynamics）方程式である。MHD 方程式は強い非線形性を持つため、解析的に解くことは（非常に限られた場合を除いて）ほぼ不可能であり、また地球ダイナモ過程を実験的に再現することも困難であるため、計算機シミュレーションが地球ダイナモを研究する上で有力な研究手段となっている。

地球ダイナモのシミュレーション研究は1990年代半ばから本格的に始まった。その後、双極子磁場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、シミュレーションモデルはますます高度化してきている。

このような中、近年注目を集めているのは、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しないので、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。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。

我々の研究グループでは、陰山聡教授（神戸大学、元 JAMSTEC 地球シミュレータセンターグループリーダー）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., Kageyama et al., *Nature*, 2008; Miyagoshi et al., *Nature*, 2010）。インヤン格子は、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ないという弱点があった。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）。

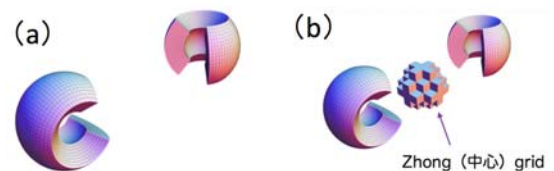


図 1. (a)インヤン格子、(b) インヤンゾン格子。

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地球ダイナモシミュレーションに応用し、地球の内核が地磁気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となる課題として、内核の影響をはっきり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現在でも成長しているので、これは未来の地球の姿と言える。また、地球よりも早く冷却の進んでいる水星などでは現在既に内核の半径は外核と同程度まで大きくなっていると考えられているので、そのよう

な惑星磁場の理解にもつながる。

地磁気発生メカニズムは、テイラー・プラウドマン定理により、外核を南北方向に貫く対流柱 (Kageyama and Sato, *Phys. Rev. E*, 1997) あるいは対流シート (Kageyama et al., *Nature*, 2008) が形成される事と密接に関わっている。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ない (図 2) 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。

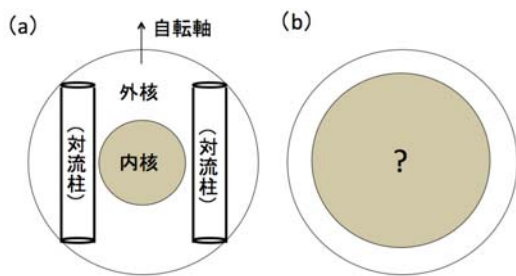


図 2. (a) 球殻が厚い場合 (現在の地球)。 (b) 薄い球殻の場合。 a のような対流柱は存在できない。(内核内は流れが無いため。)

また、インヤン格子は、固体地球科学分野のみならず大気・海洋分野や、天文科学分野にも応用されている。今回の研究による、インヤン格子を使った大規模な並列計算に関する知見がこれらの分野への応用に活かされる事も期待している。

2. 方法

インヤン格子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、(1) レイリー数 Ra (対流の活発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)、(2) $Ra=3 \times 10^5$ 、 $Ek=1.1 \times 10^{-3}$ 、 $Pm=10$ 、メッシュ数 $71 \times 514 \times 1538 \times 2 + 1266 \times 1266 \times 1266$ 、(3) $Ra=10^6$ 、 $Ek=1.8 \times 10^{-4}$ 、 $Pm=10$ 、メッシュ数 $101 \times 514 \times 1538 \times 2 + 1806 \times 1806 \times 1806$ 、以上 3 通りについて半径比 (外核半径/核半径) $=0.1$ の場合について、また (4) さらに薄い半径比 0.05 で、 $Ra=2 \times 10^3$ 、 $Ek=2.4$ 、 $Pm=5$ 、

メッシュ数 $151 \times 154 \times 458 \times 2 + 306 \times 306 \times 306$ の計算を行った。

3. 結果

図 3 に示すのは (1) - (3) 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である。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 (ダイナモが生じている)。

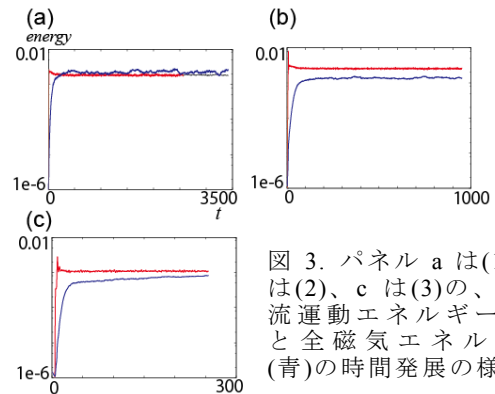


図 3. パネル a は(1)、b は(2)、c は(3)の、全対流運動エネルギー(赤)と全磁気エネルギー(青)の時間発展の様子。

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(1)では 15 及び 4591、(2)では 48 及び 4810、(3)では 91 及び 9183 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 (2016/01) 運動散逸時間より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(1)で約 390 万ステップである。これらのケースについてはさらに時間積分を行ったのち、詳細な解析を行う予定である。また、(4) の

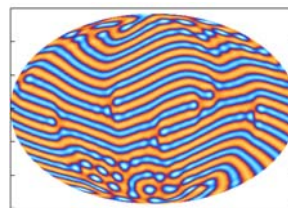


図 4. ケース(4)の計算結果(対流層の中心断面の、上昇流(赤)と下降流(青))。

ケースでは図 4 のような対流構造が得られた。この流れは (さらに大きな Pm の場合) 同様にダイナモ効果を持つ。生成された磁場は内核に侵入し、磁場構造の空間的な大規模化と時間的な安定化効果をもつと考えている。現在解析を進めているところである。