

外核上部安定成層の表皮効果に基づく新たな惑星ダイナモ領域推定

八木 優人

京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

1 はじめに

「軸対称な定常惑星ダイナモは存在しない」ことが Cowling (1934) によって証明されているが、水星の固有磁場は非常に強い軸対称双極子磁場が支配的なことが観測から分かっている。この一見矛盾した観測事実を説明する一つの仮説として、外核上部には安定成層が存在し、その層によってコア外部で観測される固有磁場が軸対称化されると考えられている。外核下部の対流によって生じる磁場が高周波数成分ほど大きく減衰する表皮効果を受ける（例えば、Christensen, 2006）、あるいは安定成層内で速度による磁場の変換（例えば、Stevenson, 1982）によって軸対称双極子磁場が観測される。安定成層の存在は惑星コアの中で磁場を発生させる電流領域を推定することで存在を示唆することが可能ではあるが、これまでに提案された磁場による惑星内部の電流領域推定手法では安定成層の存在が考慮されておらず、安定成層に内包される対流層の存在領域を正確に推定することが困難である。また磁場の軸対称化について上記の効果がどれくらい効いているのかについても明らかになっていない。そこで本研究における課題は、水星を想定した内部構造の惑星ダイナモ計算を用いて、これらの課題について解析を行うことである。

2 研究手法

惑星コアの磁気流体力学ダイナモは非線形かつ三次元問題であるため、大規模な計算資源を必要とする。本共同研究制度によるスーパーコンピュータの利用によって、水星コア流体のダイナミクスについて数値実験を行うことができた。Takahashi

(2012,2014)のMHDダイナモ計算コードを利用し、Takahashi et al. (2019) を参考にして初期条件や境界条件、無次元パラメータなどを設定し計算を行った。

3 結果

まず計算の概要を示す。図1には磁場と速度を表すものであり、速度のグラフより動径方向の速度が安定成層で抑制されている様子が確認され、これは安定成層の効果が効いていることを表している。磁場のグラフからは、対流層での磁場は非軸対称成分が多く含んでいるものに対して安定成層内では磁場が軸対称化している様子が確認できる。

Gastine et al. (2020) では安定成層が完全に静止流体かつ球形状を無視するとすると、磁場は表皮効果によって、 $\exp(\sqrt{\omega})r$ に比例して減衰することを用いてMHDダイナモ計算の結果の解釈を行った（ここで、 ω は時間周波数、 r は原点からの距離を表す）。本研究では、この方法に基づいて解釈を行うために時間周波数の推定を行なった。磁場の典型的なタイムスケールについては、ガウス係数とその一回微分のパワースペクトルの比を用いた表式を採用し計算を行なった。結果は図2の通りであり、高次数磁場のタイムスケールほど短い傾向が見られた。Christensen and Tilgner (2004) によれば磁場のタイムスケールは次数に対して反比例することが示唆されているので、今回の結果にフィッティングを行ったところおよそタイムスケールの逆数に相当する時間周波数は高いことから、高次の磁場の方がより表皮効果を受けて減衰が起きていることを示唆する結果が得られた。

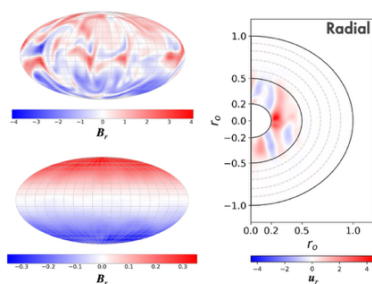


図 1 ダイナモ計算で得られた磁場と速度。左上が対流層と安定成層の境界、左下が安定成層の中間における磁場の動径方向成分であり、速度は経度方向に平均した動径方向成分を描いている。

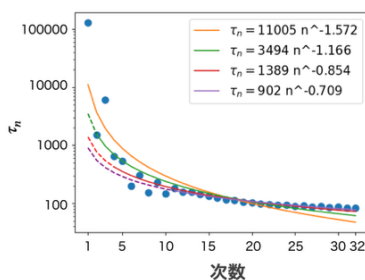


図 3 各次数の磁場のタイムスケール。曲線はそれぞれ、1~32 (橙) 2~32 (緑)、4~32 (赤)、11~32 (紫) の次数でフィッティングを行っている。

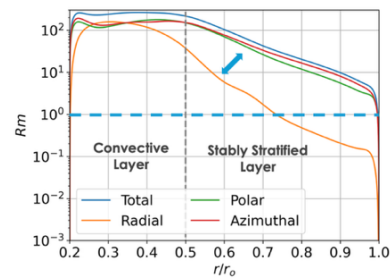


図 2 コア領域での磁気レイノルズ数。計算には速度の RMS 値を使用し、曲線はそれぞれ全成分(青)、動径方向成分 (橙)、極角方向成分 (緑)、方位角方向成分 (赤) を計算に用いている。

4 議論

ここまで表皮効果に焦点を当てて研究を進めてきたが、磁場の誘導方程式に立ち返ると磁場の時間変化は表皮効果に相当する拡散項の他に、流れによって磁場が相互作用を受ける移流項による磁場変化も存在する。この二つの効果は磁気レイノルズ数と呼ばれる無次元数によってしばしば評価される。Miyakoshi and Kageyama (2015)によれば少なくとも磁気レイノルズ数が 10 以上の場合、磁場生成が積極的に起きていると考えられている。そこで本研究で得られたダイナモ計算結果から半径ごとの速度 RMS 値を計算し、半径の関数としての磁気レイノルズ数を求めた。結果は図 3 の通りで、対流層では 100 以上のダイナモ作用が十分起きており、安定成層においても、減少はしているものの大部分で 10 以上の値を取り、安定成層においても拡散項より移流項の方が十分大きなことが示唆される結果である。

5 まとめ

観測より水星固有磁場は非常に軸対称性が強いことがわかっている。数値計算で模擬実験を行い、その結果について解析した。安定成層中で磁場が軸対称化している様子が確認され、表皮効果での減少効果は時間変化を調べることで次数依存性を見つけることができた。ただし表皮効果に加えて速度による磁場変化も考慮する必要があることが示唆され、水星磁場の軸対称化の原因は表皮効果だけでな

く、速度との相互作用についてどのような速度がどのように相互作用を起こして磁場が軸対称化しているのかを丹念に調べる必要がある。

6 謝辞

本研究の遂行にあたり、指導教官として終始多大なご指導を賜った、京都大学大学院理学研究科の藤浩明准教授に深謝致します。また九州大学理学院の高橋太准教授には本研究で使用した研究コードを提供していただきました。ここに深謝の意を表します。

本研究の一部は京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータ共同研究制度(若手・女性研究者奨励枠)によるものです。加えて本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2110 の支援を受けたものです。

7 参考文献

- Christensen, U., and A. Tilgner (2004), Power requirement of the geodynamo from ohmic losses in numerical and laboratory dynamos, *NATURE*, 429, 169-171, doi:10.1038/nature02508.
- Christensen, U. R. (2006), A deep dynamo generating Mercury's magnetic field, *Nature*, 444(7122), 1056-1058, doi:10.1038/nature05342.
- Cowling, T. G. (1933), The magnetic field of sunspots, *Monthly Notices of the Royal*

Astronomical Society, 94(1), 0039-0048,
doi:10.1093/mnras/94.1.39.

Gastine, T., J. Aubert, and A. Fournier (2020),
Dynamo-based limit to the extent of a stable layer
atop Earth's core, *GEOPHYSICAL JOURNAL
INTERNATIONAL*, 222, 1433-1448,
doi:10.1093/gji/ggaa250.

Miyakoshi and Kageyama (2015) 3. Geodynamo
Simulation in the Past, Now, and Future *J.
Plasma Fusion Res.* Vol.91, No.10 6 7 6 - 6 8 2

Takahashi, F. (2012), Implementation of a high-
order combined compact difference scheme in
problems of thermally driven convection and
dynamo in rotating spherical shells, *Geophysical
and Astrophysical Fluid Dynamics*, 106(3), 231-
249, doi:10.1080/03091929.2011.565337.

Stevenson, D. J. (1982), Reducing the non-
axisymmetry of a planetary dynamo and an
application to Saturn, *Geophysical and
Astrophysical Fluid Dynamics*, 21(1-2), 113-127,
doi:10.1080/03091928208209008.

Takahashi, F. (2014), Double diffusive convection
in the Earth's core and the morphology of the
geomagnetic field, *Physics of the Earth and
Planetary Interiors*, 226, 83-87,
doi:10.1016/j.pepi.2013.11.006.

Takahashi, F., H. Shimizu, and H. Tsunakawa
(2019), Mercury's anomalous magnetic field
caused by a symmetry-breaking self-regulating
dynamo, *Nature Communications*, 10,
doi:10.1038/s41467-018-08213-7.