

表皮効果が水星固有磁場に与える影響：ダイナモシミュレーションによる解析

#八木 優人¹⁾, 藤 浩明¹⁾, 高橋 太²⁾

⁽¹⁾ 京都大学大学院理学研究科, ⁽²⁾ 九州大学大学院理学研究院

Influence of Skin Effect on Mercury's Magnetic Field: A Dynamo Simulation Approach

#Yuto Yagi¹⁾, Hiroaki Toh¹⁾, Futoshi Takahashi²⁾

⁽¹⁾ Graduate School of Science, Kyoto University, ⁽²⁾ Faculty of Science, Kyushu University

It is thought that a stably stratified layer exists in the upper part of Mercury's outer core from its intrinsic magnetic field (e.g. Takahashi et al., 2019; Nat. Commun.). This is because higher-degree magnetic field components generated within a lower convective layer decrease selectively by skin effect within a stably stratified layer, and the magnetic field at the upper part of the core is dominated by lower-degree components. However, when estimating the depth of the intrinsic magnetic field generation using the Lowes radius —an indicator proposed by Lowes (1974; Geophys. J. Int.)—, the estimated value for Mercury is approximately half of the core radius. Importantly, the Lowes radius requires the assumption that the electric conductivity is zero above the magnetic field generating region. Still, if there is a region where the conductivity is sufficiently large such that a stably stratified layer exists over the convective layer, this assumption may not hold if a stably stratified layer with sufficiently high electrical conductivity exists above the convective layer. Therefore, when estimating the depth at which intrinsic magnetic field are generated, the magnetic field reduction by skin effect needs to be considered.

In this study, using the planetary dynamo simulation (Takahashi, 2012; J. Fluid Mech., Takahashi, 2014; Phys. Earth Planet Inter.), we try to estimate quantitatively decrease of the magnetic field by skin effect above the convective region. While it is known that the rate of magnetic field attenuation depends on its temporal frequency, but the relation between the degree of the magnetic field and its time-frequency is not obvious. Previous studies have shown a negative correlation between the degree of the magnetic field and its temporal variations by geomagnetic field analysis (Olsen et al., 2006; Geophys. J. Int.) and geodynamo simulation (Christensen and Tegner, 2004; Nature). However, a stably stratified layer is not thought to exist and the dynamo is driven only by thermal convection in those studies, so to examine a skin effect within a thermal stably stratified layer, a dynamo model driven by thermal convection with a thick thermal stably stratified layer is necessary. Therefore, using this dynamo model, we focused on estimating the relationship between the degree of the magnetic field and its attenuation within such a model.

Derived from Mercury's Lowes radius from MESSENGER's data, we considered a core structure where a stably stratified layer occupies 40%, 50%, or 60% of the outer core, and calculated the simulations with other parameters fixed. According to the results, we confirmed that a higher-degree component of the magnetic field has higher frequency, and this attenuates more in a stably stratified layer. In this presentation, we discuss the rate of skin effect to distance attenuation, a characteristic frequency of each degree, and the correlation between these and the thickness of a stably stratified layer. Moreover, we consider Mercury's Lowes radius taking skin effect into consideration.

固有磁場の特徴から、水星外核上部に安定成層が存在すると考えられており、そのコア構造モデルを用いたダイナモ計算が行われている（例えば、Takashi et al, 2019; Nat. Commun.）。これは安定成層内で起こる表皮効果によって、下部対流層で生成される磁場の高次成分が選択的に減少することで、外核上部では低次成分が支配する磁場構造が観測されることに由来する。他方で、ガウス係数を用いて固有磁場発生深度を意味する Lowes 半径 (Lowes, 1974; Geophys. J. Int.) を推定すると、水星での値はコア半径の半分以下の値を示す。重要な点は、Lowes 半径が固有磁場発生領域以上は絶縁体であるという仮定のもの値であるため、外核上部に安定成層が存在するような、対流層上部に電気伝導度が十分高い領域がある場合はこの限りではないということである。これらのことから、外核内部の固有磁場発生領域推定には、現状の Lowes 半径に加えて、水星で想定されている外核上部安定成層で起こる表皮効果による磁場減衰を考慮する必要がある。

そこで、惑星ダイナモシミュレーション (Takahashi, 2012; J. Fluid Mech., Takahashi, 2014; Phys. Earth Planet Inter.) を用いて、対流層以上における表皮効果による磁場減衰の定量化を試みた。表皮効果による磁場減衰率は磁場の時間周波数に依存していることは既知だが、磁場の次数と時間周波数の関係性は自明ではない。また、表皮効果の磁場減衰は地磁気データの解析 (Olsen et al., 2006; Geophys. J. Int.) や地球ダイナモ計算 (Christensen and Tegner, 2004; Nature) による先行研究で、次数と磁場変動のタイムスケールに逆相関を示すことがわかっているが、これらの研究では安定成層の存在を想定しておらず、かつ熱対流のみのダイナモを考えている。本研究では熱的安定成層による表皮効果について調査するために、厚い安定成層を持つ熱対流によって駆動されるダイナモモデルを用いて、磁場の次数と時間周波数の関係を新たに推定することに取り組んだ。

観測値より推定される水星 Lowes 半径をもとに、本研究でのコア構造は安定成層が外核上部の 4 割から 6 割を占めるモデルを考え、無次元パラメータなどの他の入力値は固定して計算を行った。結果より、高次ほど磁場の時間周波数が高く、安定成層内でより大きく減衰することが確認された。本講演ではさらに、コア安定成層内の磁場減衰全体に対する表皮効果による磁場減衰の割合や、磁場各次数の特徴的な変動を表す周波数と安定成層の厚さとの関連性も併せて議論する。加えて、水星における表皮効果を考慮した Lowes 半径についても議論する。