

CHAOS-8 地磁気モデルのスペクトル解析による赤道域外核上部成層構造の地域的特徴

#川口 智也¹⁾, 清水 久芳¹⁾

⁽¹⁾ 東京大学地震研究所

Regionality of the Stratified Layer at the Core Surface in the Equatorial Region Inferred from the CHAOS-8 Geomagnetic Model

#Tomoya KAWAGUCHI¹⁾, Hisayoshi SHIMIZU¹⁾

⁽¹⁾Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Geophysical observations suggest that the top of the Earth's outer core is stably stratified. For example, Helffrich and Kaneshima (2010) inferred from seismic analyses that the ~300 km layer immediately beneath the core – mantle boundary (CMB) is stably stratified. However, some studies argue that a globally stable stratified layer may not exist, while others suggest that regional variations could arise from lateral heterogeneity in the lowermost mantle (e.g., Mound et al., 2019). In this study, we investigate the regional characteristics of stratification in the uppermost outer core by analyzing short-period secular variations of the geomagnetic field, using the CHAOS-8 geomagnetic field model (Kloss et al., 2024).

In the CHAOS-8 model, the magnetic potential due to internal sources is expanded in spherical harmonics up to degree 70. Temporal variations of the Gauss coefficients up to degree 20 are represented by sixth-order B-splines over the period 1997.1 – 2025.1 (Kloss et al., 2024). We analyzed the geomagnetic field in the period 2000.0 – 2025.0.

Following Chulliat et al. (2015), we calculated the second time derivatives of the Gauss coefficients from CHAOS-8 and applied a Hann window to the terms up to degree 10. Using these coefficients, we derived the second time derivative of the magnetic field at the CMB, d^2B/dt^2 (the secular acceleration, SA), at 0.1-year intervals. From these data, we constructed time – longitude plots of the radial component of SA along 5° N. We then decomposed the radial SA into equatorially symmetric and antisymmetric components and performed two-dimensional Fourier transforms in time and longitude. We added the results at 0°, 5°, 10°, and 15° N to obtain the frequency – wavenumber spectra. The spectra showed phenomena with periods shorter than 10 years. To investigate the SA and spectra further, we applied Butterworth filters to extract short-period components with periods <5 years and 5 – 10 years and repeated the analysis. This also served to examine the correspondence between the geomagnetic field variation and SA.

Chulliat et al. (2015), using CHAOS-5, reported a standing-wave – like phenomenon in the symmetric component over the Atlantic from 2005 to 2014. Our analysis confirms that this standing wave over the Atlantic persisted until 2020. In addition, we found a standing-wave – like feature over the Pacific from 2012 to the early 2020s. The characteristics of the standing waves differ between the Atlantic and Pacific. In the antisymmetric component, westward-propagating waves similar to those reported by Chulliat et al. (2015) were observed in the Pacific, although their characteristics differ from those in the Atlantic.

These wave-like features may be explained by magnetohydrodynamic waves propagating zonally within a stably stratified layer at the top of the outer core. Bergman (1993) analytically derived the dispersion relation of equatorial magnetic Rossby waves using a two-layer density model representing an equatorial stratified layer. We assumed that the differences in short-term geomagnetic variations between the Atlantic and Pacific are due to differences in stratification thickness and applied Bergman's dispersion relation to estimate the stratified layer thickness in both regions. The results suggest that the stratified layer in the Atlantic is thinner than that in the Pacific. However, Bergman's solution was derived for a simplified system and the waves are strongly damped. It remains uncertain whether his dispersion relation can be directly applied to our analysis.

To obtain more realistic estimates of the stratified layer thickness from the observed spatiotemporal spectra, it will be necessary to compute theoretical dispersion relations through numerical modeling of magnetohydrodynamic waves, assuming equatorial stratification.

References:

Bergman, M. I. (1993). Magnetic Rossby waves in a stably stratified layer near the surface of the Earth's outer core. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 68(1 – 4), 151 – 176. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03091929308203566>

Chulliat, A., Alken, P., & Maus, S. (2015). Fast equatorial waves propagating at the top of the Earth's core. *Geophysical Research Letters*, 42(9), 3321 – 3329. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015GL064067>

Helffrich, G., & Kaneshima, S. (2010). Outer-core compositional stratification from observed core wave speed profiles. *Nature*, 468(7325), 807 – 810. <https://doi.org/10.1038/nature09636>

Kloss et al. (2024) The DTU geomagnetic field parent model and derived IGRF-14 candidate models, <https://www.spacecenter.dk/files/main/models/CHAOS-8/>

Mound, J. E., Davies, C. J., Rost, S., & Aurnou, J. M. (2019). Regional stratification at the top of Earth's core due to core – mantle boundary heat flux variations. *Nature Geoscience*, 12(7), 575 – 580. <https://www.nature.com/articles/s41561->

地球物理観測により、外核最上部が安定成層している可能性が示唆されている。例えば、Helffrich and Kaneshima (2010) は地震学的な解析により、コア-マントル境界 (CMB) 直下 300 km が安定成層していると推定した。一方で、外核上部の安定成層は全球的には存在しないとする説や、マントル最下部不均質の影響により地域差が存在する可能性についての指摘がある (例えば、Mound et al, 2019)。本研究では、CHAOS-8 地磁気モデル (Kloss et al., 2024) を用いた地磁気の短周期永年変動の解析から、地球外核上部における成層構造の地域的特徴を明らかにする。

CHAOS-8 モデルでは、内部起源磁場ポテンシャルが最大次数 70 まで球面調和展開されており、時間変化については、1997.1 – 2025.1 年の期間において次数 20 以下のガウス係数が 6 次 B スプライン関数を用いて表現されている (Kloss et al., 2024)。本研究では 2000.0 – 2025.0 年を対象として磁場解析を行った。

解析手法は主に Chulliat et al. (2015) に従った。まず、CHAOS-8 からガウス係数の時間二階微分を求め、最大次数 10 までを対象として Hann window を適用した。次に、この係数を用いて、CMB における磁場の時間二階微分 d^2B/dt^2 (Secular Acceleration : SA) を算出した。計算は対象期間に対し 0.1 年ごとに行った。このデータを用いて、北緯 5° における SA の動径成分の時間-経度図を作成した。また、SA の動径成分を赤道に対して対称成分と反対称成分に分解し、それぞれに時間と経度に対する二次元フーリエ変換を実施した。さらに北緯 0° , 5° , 10° , 15° における結果を加算し、周波数-波数スペクトルを求めた。その結果 10 年以下の周期を持つ現象が確認された。これをより詳細に調べるため、Butterworth フィルターを用いて 5 年以下および 5 – 10 年の短周期成分を抽出し、同様の解析を行った。これは磁場と SA の対応を確認する意味もある。

Chulliat et al. (2015) の CHAOS-5 を用いた解析では、大西洋域の対称成分に定在波的な現象が 2005 年から 2014 年にかけて見られたことが報告されている。本研究の解析では、前述の大西洋域の定在波が 2020 年まで続いていることに加えて、2012 年から 2020 年代前半まで太平洋域でも定在波的な現象が存在することを確認した。一方で、大西洋と太平洋では、定在波の特徴は異なる。また反対称成分では Chulliat et al. (2015) と同様の西向きに伝播する波が太平洋域でも確認できたが、こちらも対称成分と同様に太平洋域に大西洋域とは異なる挙動が見られた。

これらの波動的な特徴は外核表層に存在する、東西方向に伝搬する磁気流体波で説明できる可能性がある。Bergman (1993) は、赤道域に存在する安定成層を表現した密度二層モデルを用いて、赤道磁気ロスビー波の分散関係を解析的に求めた。本研究では、大西洋域と太平洋域における短期地磁気変化の差が安定成層の厚さの違いによると仮定し、Bergman の分散関係を用いて両領域での安定成層の厚さを推定したところ、大西洋の方が太平洋に比べて成層が薄い可能性が示唆された。しかし、Bergman の解析解は単純化された系に対して求められたものであり、また波動としては damping が強い場合、この分散関係を本解析に直接適用できるかについては議論の余地がある。

本研究で得られた時空間スペクトルを用いて、よりもっともらしい安定成層の厚さを推定するためには、赤道域に安定成層を仮定した磁気流体波の数値モデリングにより、理論的な分散関係を求める必要がある。

参考文献

Bergman, M. I. (1993). Magnetic Rossby waves in a stably stratified layer near the surface of the Earth's outer core. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 68(1 – 4), 151 – 176. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03091929308203566>

Chulliat, A., Alken, P., & Maus, S. (2015). Fast equatorial waves propagating at the top of the Earth's core. *Geophysical Research Letters*, 42(9), 3321 – 3329. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015GL064067>

Helffrich, G., & Kaneshima, S. (2010). Outer-core compositional stratification from observed core wave speed profiles. *Nature*, 468(7325), 807 – 810. <https://doi.org/10.1038/nature09636>

Kloss et al. (2024) The DTU geomagnetic field parent model and derived IGRF-14 candidate models, <https://www.spacecenter.dk/files/main/models/CHAOS-8/>

Mound, J. E., Davies, C. J., Rost, S., & Aurnou, J. M. (2019). Regional stratification at the top of Earth's core due to core – mantle boundary heat flux variations. *Nature Geoscience*, 12(7), 575 – 580. <https://www.nature.com/articles/s41561-019-0381-z>