

外部磁場による液体金属の対流構造の変化

柳澤 孝寿 [1]; 山岸 保子 [1]; 櫻庭 中 [2]; 浜野 洋三 [1]; 田坂 裕司 [3]; 矢野 可南子 [4]; 武田 靖 [5]

[1] IFREE, JAMSTEC; [2] 東大・理・地球惑星科学; [3] 北大・工・エネルギー環境; [4] 北大・工・機械; [5] 北大・工・機械

Convection pattern in liquid metal under external magnetic field

Takatoshi Yanagisawa[1]; Yasuko Yamagishi[1]; Ataru Sakuraba[2]; Yozo Hamano[1]; Yuji Tasaka[3]; Kanako Yano[4]; Yasushi Takeda[5]

[1] IFREE, JAMSTEC; [2] Dept. of Earth and Planetary Science, Univ. of Tokyo; [3] Energy & Environmental Sys., Hokkaido Univ.; [4] Mech. Eng., Hokkaido Univ.; [5] Mechanical Engineering, Hokkaido Univ.

The convective flow in the outer core of the Earth is supposed to be extremely turbulent, because molten iron has very low viscosity and the spatial scale is large. It is important for the outer core dynamics that the flow behaves turbulently under the influence of rotation and magnetic field. In many numerical dynamo simulations, the values of Prandtl number (Pr) and magnetic-Prandtl number (Pm) are set around one, but these values for liquid metals are actually much smaller than one. Laboratory experiment using liquid metal is a helpful method to clarify turbulent flow system with such low Pr and Pm, though it is difficult to realize self-sustained dynamo action.

We focused on Rayleigh-Benard convection with liquid metal under external magnetic field. The system is not rotating. Liquid metals are opaque fluids, so optical methods for the flow visualization cannot be applied. We improved the Ultrasonic Velocity Profiler method to be applied for the fine-scale velocity field of the flow occurring in liquid metals. In this study, we aim to directly measure the velocity field in convection with liquid metal and to clarify the characteristic flow structure reorganized by external uniform magnetic field.

Without magnetic field, large-scale flow pattern is clearly observed, which is interpreted as a kind of organized structure of turbulence. The remarkable feature of this large-scale flow is its fluctuation. It shows clearly regular periodic behavior, whose typical timescale is comparable to the circulation time of the mean flow. When we apply horizontal magnetic field, the large-scale flow is reorganized as two-dimensional roll with its axis to become parallel to the direction of the magnetic field. As the intensity of the applying magnetic field increases, the periodic components of the flow weaken and the mean velocity of the roll-like flow pattern increases. At the same time, fluctuation with much longer timescale is observed, which is characterized by the reversal of the flow direction of the two-dimensional roll. The reversal occurs randomly, which enables us to gain an insight to the outer core dynamics. Under much stronger magnetic field, the flow pattern becomes steady two-dimensional roll without any fluctuation. These results are interpreted as the anisotropy of the effective diffusivity depending on the intensity of the magnetic field.

外核での熔融鉄の流動が地球磁場を生成し維持している。地球を模した回転系の熱対流での磁場生成の過程が、電磁流体力学の基礎方程式系に基づいた大規模数値シミュレーションで再現されていて、そのメカニズムの理解が大きく進んだ。しかし計算機の制約から粘性などの物性値は金属とは懸け離れたものを用いて簡略化しているのが現状である。外核内で生じている流動場とその物理を知るためには、実際に液体状態の金属を用いた室内実験を行うことで、乱流状態をきちんと理解するとともに流れと磁場の関係を明らかにする必要がある。一方、実験では磁気レイノルズ数を大きくするには限界があり誘導される磁場は小さい。よって、外から与えた磁場に対する流れの応答を調べることが中心となる。

液体金属は低粘性・高熱伝導率で特徴づけられ、低いプラントル数をもつ流体の代表である。低プラントル数流体は低いレイリー数でも容易に乱流化することが知られている。さらに、液体金属は電気の良い良導体でもあり、磁場の存在下での流体運動は誘導電流を生み出し、磁場と流れの方向に依存した力を受ける。これまでの液体金属を用いた磁場と熱対流に関する実験では、数点での温度の計測から流れの様相を推定するということが行われてきた。より直接的に液体金属の対流の速度場を計測することが望まれていて、それには超音波のドップラーシフトを利用する方法が有効である。我々は液体金属による熱対流のパターンと磁場との関係を調べることを目的として、この速度計測方法を用いて、広い容器内に生じる流れのパターンの可視化を行った。それにより、磁場の影響を受けて変化する乱流の大規模構造を明瞭に理解することができるようになった。

非回転系で磁場なしの場合、液体金属の乱流状態は振動する大規模構造で特徴づけられる。一様な水平磁場をかけると、その強度が弱い場合は構造に変化は見られないが、ある程度の強度になると磁場と平行なロール軸を持つ二次元性の強い対流構造が明瞭になる。更にその構造は、流れの周期より顕著に長いタイムスケールで不規則に対流の方向が逆転するという興味深い振る舞いを示す。この現象は地球磁場の反転にも重要な示唆を与えるものである。より大きな磁場強度では、パターンはほぼ二次元定常となり逆転は起こらない。これらの結果は磁場の影響による実効的な拡散係数の異方性として解釈でき、我々はパターンに影響を与える磁場強度の基準を明確化することに成功した。