回転球殻流体における三次元非線形マグネトコンベクションの数値実験

A numerical experiment of three-dimensional nonlinear magnetoconvection in a rotating spherical fluid shell

桜庭 中 [1], 河野 長 [2]

Ataru Sakuraba [1], Masaru Kono [2]

[1] 東大・理・地球惑星物理, [2] 岡山大固地研

[1] Dept. of Earth and Planetary Physics, Univ. of Tokyo, [2] Inst. for Study of Earth's Interior, Okayama Univ.

回転する球殻電磁流体が、回転軸に平行な一様磁場のもとで熱対流運動する様子（マグネトコンベクション）を、三次元数値実験によって調べた。回転系における熱対流運動に特徴的な対流ロールは、印加した磁場によって著しく変形し、流体運動の様式や流体のダイナモ作用で発生する磁場強度などに大きな影響を与えた。とくに高気圧性の対流ロールが磁場によって選択的に強化され、流れ場を支配する。この数値実験の結果は、地球のコアにおけるダイナミクスを考えるためのひとつの基本的な視点を与える。

回転する球殻電磁流体が、回転軸に平行な一様磁場のもとで熱対流運動する様子（マグネトコンベクション）を、三次元数値実験によって調べた。回転系における熱対流運動に特徴的な対流ロールは、印加した磁場によって著しく変形し、流体運動の様式や流体のダイナモ作用で発生する磁場強度などに大きな影響を与えた。とくに高気圧性の対流ロールが磁場によって選択的に強化され、流れ場を支配する。この数値実験の結果は、地球のコアにおけるダイナミクスを考えるためのひとつの基本的な視点を与える。

数値実験はまず磁場がない状態での熱対流運動からはじめる。この基本状態での流れ場は、自転軸に平行に発達した対流ロール（渦柱）で特徴づけられ、実験では10組（高気圧性が10本、低気圧性が10本）のロールが観察された。次に自転軸に平行な一様な磁場を外部からかける。流体は有限な電気伝導度をもっているため、この流体の対流運動はいわゆる磁気対流（マグネトコンベクション）と呼ばれるものである。これは地球のコアのダイナミクスを研究する上でよく用いられる手法である。

印加する磁場の強さはエルサッサ数（コリオリ力に対するローレンツ力の比）で表すのが便利である。数値計算ではエルサッサ数を段階的に0.2から5まで変化させた。エルサッサ数が1よりも小さいときは、熱対流の様式は磁場がないときのそれとそれほど変わらない。回転系からみた流れ場の全運動エネルギーは磁場の増大とともにわずかに減少し、一方流れ場によって誘導された磁場（印加磁場を差し引いたもの）のエネルギーはおおよそエルサッサ数に比例して増大する。対流ロールの赤道断面の形は磁場がない状態とかわらず、自転軸から遠ざかるにしたがって東の方向に細くたなびくような格好をしている。

さらに磁場を強くし、エルサッサ数が1から2になるところで、対流の様式の転移（モードチェンジ）が観察された。まず誘導された磁場のエネルギーのレベルが一桁以上も急増する。運動エネルギーももとの無磁場状態のそれより増加する。対流ロールの数は変化しないが、その強度において、高気圧性のロールと低気圧性のそれとの間で著しい非対称性がみられ、高気圧性のロールが流れ場を支配するようになる。ロールの赤道断面の形はほぼ動径方向にまっすぐ伸びているが、高気圧性のロールについてはむしろ西側にたなびいているように見える。またさらに磁場を強くするとロール状の定常な流れは不安定を起し、時間的に変動する解に移行する。

こうした対流の様式の変化は、流体内の磁束の分布と密接に関係している。エルサッサ数が1よりも小さいときは、赤道面付近における南北方向の（自転軸に平行な）磁場は高気圧と低気圧の間の領域に存在している。一方エルサッサ数が1を越え、対流の様式が変化したときには、磁束は高気圧ロールの中に閉じ込められている。このとき高気圧ロールではローレンツ力とコリオリ力がうまくバランスしている。そこでは運動を妨げることなく強い磁場を維持することができ、またその結果として高気圧ロールの強化がおこる。以上のことから、赤道面付近の磁束が高気圧ロールに閉じ込められるかどうか、ローレンツ力とコリオリ力がバランスする（マグネトストロフィックな）対流の様式の実現のかぎをにぎっていることが推測される。そして地球のコアでは、そのような状態が実際に起こっているものと考えられる。