

一様磁場中の回転流体球内の線形マグネトコンベクション

Linear magnetoconvection in rotating fluid spheres permeated by a uniform axial magnetic field

桜庭 中[1]

Ataru Sakuraba[1]

[1] 東大・理・地球惑星科学

[1] Dept. of Earth and Planetary Sciences, Univ. of Tokyo

回転する流体球内のマグネトコンベクションの線形解析をおこなった。流体球には自転軸に平行な一様磁場を外から印加し、熱対流を起こす。系がじゅうぶん高速回転し、粘性の効果が無視できる条件下で、臨界レイリー数とそこでの対流パターンとを調べた。その結果、(1) 5つの異なる対流モードが識別できること、(2) 臨界レイリー数が磁場強度の関数として極小値をとること、(3) 回転軸に平行な対流セルで特徴づけられる二次元的なモードと、極域で活発な子午面環流で特徴づけられる三次元的なモードとが存在すること、などの新たな知見を得ることができた。

回転する流体球内のマグネトコンベクションの線形解析をおこない、その地球コア内の対流への応用を検討した。流体球には自転軸に平行な一様磁場を外から印加する。さらに球内には一様な熱源を仮定し、自己重力場のもとで熱対流を起こす。系を特徴づける無次元パラメータには、エクマン数、エルサッサ数、レイリー数などがある。これらはそれぞれコリオリ力に対する粘性力、ローレンツ力、および浮力の相対的な効果をあらわしている。解析ではエクマン数は固定し、対流不安定をおこすような臨界レイリー数をエルサッサ数の関数として求める。いくつかの計算結果から、エクマン数を10のマイナス6乗程度にすると、粘性の効果がほぼ無視しうような対流状態を実現することがわかった。またエクマン数が10のマイナス5乗程度でも、粘性ゼロの極限を比較的良好に近似することもわかった。そしてエクマン数がそれよりも大きいと、回転系のマグネトコンベクションに特有な現象は見えにくい。

エクマン数を2かける10のマイナス6乗に固定して、さまざまな境界条件を課して系統的な数値計算をおこなった。その結果、磁場強度に応じて5つの異なる対流モードが確認された。それらは地衡流(G)モード、極域対流(P)モード、磁気地衡流(E)モード、速い磁気対流(F)モード、および遅い磁気対流(S)モードである。このうち後四者が粘性の影響をほとんど受けない、マグネトコンベクションに特有のモードである。

地球のコア内の対流への応用としては、PおよびEモードが重要と考えられる。Pモードは長波長の子午面環流で特徴づけられ、多くの場合軸対称で流体粒子が赤道面を貫くようなモードとなって現れる。その結果成長する磁場は四重極子磁場である。Eモードもやはり長波長の対流モードであるが、自転軸に平行な二次元的対流セルで特徴づけられる。この二次元性は修正されたテラー・プラウドマンの定理によって説明することができる。Eモードがもし非線形的に成長したとすれば、軸双極子磁場が生成されることが推測される。PおよびEモードのレイリー数は、エルサッサ数の関数として極小値をとる。それらはエルサッサ数が2から3のときに最小化される。

これらの対流モードは、コア・マントル境界における温度の境界条件の影響を強く受ける。熱流束固定の温度境界条件をもちいた場合、Pモードの臨界レイリー数は小さくなる。このレイリー数の値はEモードのそれよりも小さくなるので、結局Eモードは現れない。ところが温度固定の条件をつかうと、Pモードはより安定になり、Eモードが現れる。

さらに対流モードは内核の有無にも敏感に反応する。とくに現在の地球程度に内核が存在した場合、いくら熱流束固定の条件をつかったとしても、Pモードはより安定になる傾向をもち、Eモードが現れ出す。これは子午面環流が固体の内核の存在によって阻まれるからである。実際、PモードとEモードの臨界レイリー数は、地球程度の内核が存在する場合にはほぼ同程度である。

この解析結果は、地球コア内の対流現象に関するいくつかの重要な示唆を与える。とくに、加えた磁場が双極子磁場の一種であるにもかかわらず、ある状況下では四重極子磁場を生成するようなPモードが卓越する、という点がきわめて興味深い。