

Numerical study of convection and dynamo in a rotating spherical shell: Implications for solidification scenarios in planetary cores

谷口, 陽菜実

<https://hdl.handle.net/2324/4474946>

出版情報 : Kyushu University, 2020, 博士 (理学) , 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名	谷口 陽菜実		
論 文 名	Numerical study of convection and dynamo in a rotating spherical shell: Implications for solidification scenarios in planetary cores (回転球殻における対流とダイナモに関する数値的研究：惑星コアの固化シナリオへの示唆)		
論文調査委員	主 査	九州大学	准教授 高橋 太
	副 査	九州大学	教授 金嶋 聡
	副 査	九州大学	准教授 吉田 茂生
	副 査	東京大学	教授 清水 久芳

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文は、地球型惑星内部の外核の対流と固有磁場の生成過程を詳細に調査した戦略的な研究である。地球、水星、ガニメデは外核の対流によるダイナモ作用によって現在も固有磁場を保持している固体天体であるが、観測される磁場は三者三様であり、その特徴は大きく異なっている。各天体の磁場は外核対流に伴うダイナモの違いを反映したものであり、外核の対流は天体の熱進化の結果として生じている。そうしたことから、磁場観測は天体の起源と進化を理解する上で非常に重要な手段として知られている。しかしながら、地球以外の天体に対する磁場観測データは非常に限られている上に、外核の対流とダイナモの物理に関する基礎的な理解は依然として十分とは言えない。人工衛星による磁場探査の機会は非常に稀であるが、その機会を十分に活かすには外核のダイナミクスとダイナモに関する基礎的理解を事前に確立しておくことが必須である。それらを行ったのが本研究である。

外核の対流の駆動力は核内部の温度、圧力、組成などの諸条件に依存して概ね二つに大別される。内核が形成される際の軽元素・潜熱の解放によって、外核の底から駆動されるボトムアップ型がその一つであり、もう一つは、例えば、外核の固化がコア-マントル境界付近で生じて、「鉄の雪」が降ることによって駆動されるトップダウン型である。異なる対流様式によるダイナモは、それぞれ異なる形態の磁場を作る傾向にあることが知られているが、そのメカニズムについては全く明らかになっていない。ダイナモ問題は本質的に三次元かつ、非線形性の強い系であり、これらが理解を難しくする要因としてあげられる。そこで本論文では、ダイナモ作用の物理素過程の理解を目的として、線形対流開始問題と非線形 MHD ダイナモ問題に対する二段階のアプローチを採用した。

第一段階では、回転球殻における線形の対流開始問題を解いて、各対流様式の基本的な特徴と相違を理解することを行った。臨界レイリー数および臨界東西波数を精密に求め、エクマン数に対するべき関数的振舞いを決定した。この結果は局所解析などの先行研究と整合的なものであった。次に、各臨界モードについて、特徴的な対流柱構造が現れる深さが浮力の供給される場所の違いを反映して異なることを確認し、その違いを両者のエネルギー収支の違いに基づいて明らかにすることを試みた。浮力によるエネルギー供給と粘性による散逸が大局的には主要なバランスである点は共通であった。一方で、粘性散逸の最大値はトップダウン型では柱状対流渦の上端、下端に生じる一方、ボトムアップ型では赤道域に集中し、柱状に南北に伸びた構造をしていることが分かった。ト

トップダウン型では圧力、粘性応力による仕事対流渦の両端で有意に存在しており、こうした構造は浮力フラックスが外側境界で最大となるトップダウン型の特徴であること明らかになった。ボトムアップ型においては、内側境界低緯度領域に粘性散逸が集中しており、内側境界に沿って内核接円筒の内部から出入りする流れが確認された。臨界モードにおいてこのような流れが発見されたのは初めてである。こうした流れが生じる原因について、粘性散逸項を粘性応力各成分からの寄与に分解することで明らかにし、質量保存則に基づく解釈を展開した。さらに、流れ場のヘリシティを計算し、ボトムアップ型の場合がトップダウン型の場合よりも系統的に高いヘリシティを持つことを示した。この結果は本研究によって初めて明らかになったことである。ヘリシティはダイナモ作用を議論する上で重要な流れ場の性質の一つであり、特筆すべき結果であると評価する。

第二段階では、上記で得られた線形解析結果の理解を基礎として、ボトムアップ型・トップダウン型に対する非線形のMHDダイナモ問題を解いた。レイリー数は乱流的な解になるような値ではなく、自励ダイナモが維持され得る最小値を探した。その結果、トップダウン型では臨界レイリー数の約4倍程度で自励ダイナモが実現されたのに対して、ボトムアップ型では臨界値の20倍以上ものレイリー数が必要であることが示された。この結果はトップダウン型の対流のほうがダイナモを維持し易いことを示唆し、初期の地球ダイナモや惑星のダイナモを議論する上で重要な発見といえる。一方で、線形解析や先行研究の結果とは一見矛盾する結果であることから議論が必要である。その点に関して、本研究では対称性に関する仮定がなされており、重要な非線形カップリングが意図的に落とされていることが指摘された。対称性に関する非線形カップリングの重要さの度合いの違いが、ヘリシティ生成およびダイナモ開始点の違いに繋がっている可能性があり、ダイナモ作用の物理過程の理解につながる多くの示唆が示された。また、トップダウン型ダイナモで実現された磁場の構造は、現在の地球磁場のような双極子型ではなく、次数3が卓越する8重極子型であることが示された。この結果は水星、ガニメデのような小型固体天体の磁場観測との比較や、新たな観測計画を提案・議論する上で重要な材料となり得る。

以上の結果、本論文は、固体天体のダイナモの違いに対する疑問に対して初めて戦略的に取り組み、磁場構造と対流を駆動するメカニズムの違いを関連付ける基礎を構築したという意味で、地球惑星物理学への学術的な寄与が大であると判断する。

よって、本研究者谷口陽菜実君は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。