

A numerical study of a long-term dynamo evolution with special reference to the Moon

兵藤, 史

<https://hdl.handle.net/2324/4784412>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (理学) , 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名	兵藤 史			
論 文 名	A numerical study of a long-term dynamo evolution with special reference to the Moon (月のダイナモの長期的な進化に関する数値的研究)			
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 聰
	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、月内部の外核の対流によって生成される月固有磁場の長期的進化を詳細に調査した研究である。アポロ計画によって持ち帰られた月岩石試料対して近年行われた、岩石磁気特性の再解析から、月は最長で 42.5 億年前から 35.6 億年前までの長期間、固有の磁場を保持していたことが提唱されている。一方で、月磁場は 39.4 億年前には既に失われていたという研究結果も報告されている。このように、月磁場の存在期間については近年活発な議論がなされており、現在の月科学における重要な問題の一つとなっている。現在の月磁場研究に関する主な課題は、先に挙げた存在期間と、その生成過程および、その時間変化である。これらは月の起源およびその進化過程と密接に関連しており、本研究は月の進化を磁場という視点から議論しようと試みた研究として位置づけられる。

ダイナモ作用は星、惑星や衛星といった天体が固有の磁場を生成・維持する一般的物理過程として知られている。地球の場合、外核の対流によるダイナモ作用によって地球磁場が生成・維持されているが、月のような地球に比べて小さな天体に関しては、外核の対流以外に様々な駆動源によるダイナモ過程が提案されており、複雑な状況となっている。月磁場の存在期間を明らかにすることは月ダイナモの駆動源を拘束する上でも非常に重要であり、数億年間以上の長期間働き続けることが可能なダイナモの駆動源と現時点で考えられているのが、外核の組成対流によって駆動されるダイナモである。また、古月磁場強度の研究によると、約 33 億年前に磁場強度の著しい減少が見られ、ダイナモの停止または、ダイナモの駆動源の遷移に伴う変動と考えられている。しかるに、上に述べた組成対流によるダイナモの寿命は優に 10 億年以上はあるため、古月磁場強度変動の研究結果とは、必ずしも整合的なものとなっていない。本研究の目的は、組成対流によって駆動される MHD ダイナモの数値シミュレーションと、熱史計算を組み合わせるという独自のアプローチを用いて、月磁場の存在期間とその強度変動を同時に説明可能な月ダイナモの進化モデルを作成することである。

核の進化は、冷却による流体核の固化に伴う内核の成長と、核から放出される熱流束の変化で概ね記述され、時間スケールは 1 億 - 10 億年程度である。数億年という時間スケールは月のダイナモ作用の典型的時間スケール (100 - 1000 年程度) と比べて桁違いに長いため、大きく異なるこれら二つの時間スケールに関する変動を同時に扱うことは現実的ではない。そこで、本研究では離散的に内核サイズを指定してダイナモシミュレーションを実施した。それぞれの内核サイズの場合

に対応するダイナモシミュレーションの無次元パラメータは、熱史計算に基づいて整合的に与えられる。こうした手順を取ることで、離散的にはあるが、長期間のダイナモ進化を調査することを可能にした。これは月ダイナモの研究において初めて取られたアプローチである。

系統的な MHD ダイナモの数値シミュレーションを実施したところ、内核成長に伴い特徴的な二通りの進化を示す結果を得ることが出来た。一つ目は強い双極子的な磁場を維持しながら、その後比較的短い時間スケールでダイナモが停止する場合である。二つ目は、強い双極子の磁場から弱い非双極子的磁場への遷移を経た後にダイナモが停止する場合である。後者では、内核の成長に伴い、外核の対流構造が東西波数 1 の大スケールモードが卓越することと対応して、磁場のレジーム遷移が生じたことが確認された。ダイナモシミュレーションの結果を熱史計算の結果を用いて実時間に較正したところ、ダイナモが維持される期間は古月磁場研究の結果が示すものと概ね整合的な範囲であった。本研究結果から、月ダイナモの停止の仕方について、1：双極子的構造を維持しながら停止する場合、2：非双極子的構造への遷移を経た後に停止する場合の、二つの可能性があることが示唆された。次に、古月磁場強度との比較を行った。月表面での磁場強度は核表面での磁場を上方接続することで得られるが、その際、多重極子成分は距離による減衰度合いが双極子よりも大きくなる。そのため、非双極子型ダイナモへのレジーム遷移を経る場合は、月表面で観測される磁場強度が一桁以上の減衰を示すことが分かった。この結果は古月磁場強度変動と比べて相対的にはあるが、同程度な変動であることが確認された。

以上の結果から、本研究では以下に示す古月磁場強度変動に関する重要な結論を得ることができた。1：一桁程度の古月磁場の強度減少はダイナモの他の駆動源への移行を必要とせず、組成対流による対流駆動型のダイナモという単一の過程によって説明することができる。2：古月磁場強度の減少は内核成長に伴う外核の対流構造の変化による、ダイナモのレジーム遷移を反映している可能性がある。これらの結果は従来手法による研究では得ることが出来ないもので、本研究による、熱史計算と MHD ダイナモシミュレーションを組み合わせるという独自のアプローチを採用することによって初めて得られたものである。このことから本研究の新規性、独創性は非常に高いものであると評価することができる。

上記結果をまとめると、本論文は、月ダイナモの存在期間と古月磁場強度変動のメカニズムに対する疑問に対して初めて戦略的に取り組み、核の熱進化と対流、磁場構造を関連付ける研究を系統的に行い、月ダイナモの進化に対する新しいモデルを提案したという意味で、地球惑星科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、兵藤史君は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。