

# 回転球殻 MHD ダイナモ： 初期磁場及び力学的境界条件の影響に関する考察

## 学位論文内容の要旨

固有磁場を持つ天体は多く知られている。近年の計算機能力の向上によって、天体内部の流体運動とそれに伴うダイナモ作用の数値計算が精力的に行なわれる様になった。しかしながら、現在の計算機資源では実パラメータでの数値実験は困難であり、現状の数値計算可能な範囲においてパラメータや物理設定に対する解の依存性を把握することが、観測される天体固有磁場のダイナモ作用についての洞察を深めることにとって有益であると考えられる。

本研究では、これまであまり調べられていなかったダイナモ解の初期磁場および力学的境界条件への依存性を数値的に調べパラメータ空間上で整理した。用いたモデルは回転球殻中のブシネスク磁気流体モデルである。計算したパラメータ範囲はプラントル数  $Pr=1$ 、エクマン数  $Ek = 10^{-3}$ 、球殻の内径外径比  $\xi=0.35$ 、磁気プラントル数  $Pm=1\sim 50$ 、レイリー数は臨界値の  $2\sim 10$  倍である。力学的境界条件として、球殻両端が滑り無し条件の場合と、球殻下端が滑り無し条件、球殻上端が応力無し条件の場合、初期磁場として、運動エネルギーの約 100 倍の「強い初期磁場」と運動エネルギーの約 0.01 倍の「弱い初期磁場」の場合の 4 ケースについて数値実験を行なった。数値計算は、初期に熱対流計算を行ない統計的平衡状態を求め、その場に対して磁場を付与することでダイナモ計算を実行した。

初期に運動エネルギーに比して磁気エネルギーの大きい磁場を付与したダイナモ計算では、上端境界条件を応力無しにした場合のダイナモ解の存在する領域が両端とも滑り無し条件の場合に比して狭くなり、高レイリー数側に移動した。しかしながら、得られたダイナモ解はどちらの境界条件設定においても、これまでの研究で良く知られた  $\alpha^2$  ダイナモであった。初期磁場が強い場合に境界条件の影響が表われず、特に熱対流計算で形成されていた強い帯状流の影響がほとんど表われないことは、磁気エネルギーが大きい場合には強い磁気圧のために流れ場の構造が高気圧性の循環へとすぐに移行してしまい、低気圧性の循環である帯状流は直ちに弱められてしまうことから理解される。

初期に運動エネルギーに比して磁気エネルギーの小さい磁場を付与したダイナモ計算では、どちらの境界条件設定においてもダイナモ解の存在領域が高レイリー数側、高磁気プランドル数側に移動した。球殻両端に滑り無し条件を課した場合に得られたダイナモ解は、初期磁場の大きさによらず  $\alpha^2$  ダイナモであった。一方で、上端に応力無し条件を課した場合の計算では、磁気エネルギーが運動エネルギーに比して小さい新しい弱磁場ダイナモ解が得られた。このダイナモ解は上下二層の空間的構造により特徴づけられる。上層は、強い順行帯状流と動径外向きに広がった螺旋状の対流渦が支配的である。この螺旋渦は自転と同方向に伝播し、あまり組織化されていない。その一方で、下層は自転と逆向きに伝播する柱状の乱流対流渦が支配的である。上層の強い帯状流は下層で形成された磁場が球殻表面に表れることを妨げている。このダイナモ解は上下二層の空間的構造により特徴づけられる。上層は、強い順行帯状流と動径外向きに広がった螺旋状の対流渦が支配的である。この螺旋渦は自転と同方向に伝播し、あまり組織化されていない。その一方で、下層は自転と逆向きに伝播する柱状の乱流対流渦が支配的である。上層の強い帯状流は下層で形成された磁場が球殻表面に表れることを妨げている。

この弱磁場ダイナモ解の磁場生成過程を調べるために、下層と上層それぞれの伝播速度で経度方向に移動する座標系で時間平均をとり、上層と下層それぞれの速度場と磁場の特徴的な構造を抽出することに成功した。さらに、この弱磁場ダイナモ解の運動エネルギーと磁気エネルギーの収支解析を行ない、運動および磁気エネルギーのトロイダル成分とポロイダル成分のエネルギー変換を明確にした。これらの解析を合わせることで運動エネルギーのトロイダル、ポロイダル成分が磁場のトロイダル、ポロイダル成分へと変換される領域を特定した。球殻下層において、対流渦によるトロイダル磁場の磁力線の引き伸ばしによって渦状のポロイダル磁場が生成される。この渦状の磁力線が間欠的に上層に貫入する対流運動によって持ち上げられ、球殻上層の螺旋渦に巻き込まれ引き伸ばされてトロイダル磁場が形成される。このトロイダル磁場が間欠的に下層に落ちてきて内側領域の対流渦に引き込まれ、再び渦状のポロイダル磁場を形成する。これらの過程を繰り返すことで自励的な磁場が生成維持されている。

この新しい弱磁場ダイナモ解の存在は、天体表面における磁場が弱い場合であっても天体内部では活発に磁場が生成維持されている可能性があることを示唆している。天体内部の磁場は観測できないため、その大きさについては未だ良くわかっておらず、場合によっては、表面での磁場活動に比べて内部の磁場活動が強い天体が存在するかもしれない。また、新しい弱磁場ダイナモ解の存在は、ダイナモ解が初期磁場の大きさに依存すること、すなわち天体固有磁場の形成初期段階で「磁場の種」として外部から与えられる磁場によって、現在の磁場の構造が変わる可能性を示している。

# 学位論文審査の要旨

主 査 准教授 石 渡 正 樹

副 査 教 授 渡 部 重 十

副 査 教 授 倉 本 圭

副 査 教 授 林 祥 介 (神戸大学大学院

理学研究科)

副 査 准教授 竹 広 真 一 (京都大学

数理解析研究所)

学 位 論 文 題 名

## 回転球殻 MHD ダイナモ :

### 初期磁場及び力学的境界条件の影響に関する考察

近年の計算機能力の向上によって、天体内部の流体運動とそれに伴うダイナモ作用の数値計算が精力的に行なわれる様になった。しかしながら、現在の計算機資源では実パラメータでの数値実験は困難であり、現状の数値計算可能な範囲においてパラメータや物理設定に対する解の依存性を把握することが、観測される天体固有磁場のダイナモ作用についての洞察を深めることにとって有益であると考えられる。

本論文は、これまであまり調べられていなかった初期磁場および力学的境界条件を変えた場合のダイナモ解の様相を数値的に調べ、パラメータ空間上で整理を行ったものである。回転球殻中のブシネスク磁気流体モデルを用いて、プランドル数を 1, エクマン数を  $10^3$ , 球殻の内径外径比を 0.35, 磁気プランドル数を 1 から 50, レイリー数を臨界値の 2 から 10 倍の場合について考察している。力学的境界条件として、球殻両端が滑り無し条件の場合と、球殻下端が滑り無し条件で球殻上端が応力無し条件の場合の二通りを用いている。

初期に運動エネルギーに比して磁気エネルギーの大きい磁場を付与したダイナモ計算では、上端境界条件を応力無しにした場合のダイナモ解の存在するパラメータ領域が、両端とも滑り無し条件の場合に比して高レイリー数側に移動することが示された。またダイナモ解の存在領域が両端とも滑り無し条件の場合に比べて狭くなった。しかしながら、得られたダイナモ解はどちらの境界条件設定においても、これまでの研究で良く知られた  $\alpha^2$  ダイナモであった。初期磁場が強い場合に境界条件の影響が表われず、特に熱対流計算で形成されていた強い帯状流の影響がほとんど表われないことは、磁気エネルギーが大きい場合には強い磁気圧のために流れ場の構造が高気圧性の循環へとすぐに移行してしまい、低気圧性の循環である帯状流は直ちに弱められてしまうことから理解される。

初期に運動エネルギーに比して磁気エネルギーの小さい磁場を付与したダイナモ計算では、どちらの境界条件設定においてもダイナモ解の存在領域が高レイリー数側、高磁気プランドル数側に移動した。球殻両端に滑り無し条件を課した場合に得られたダイナモ解は  $\alpha^2$  ダイナモであった。一方で、上端に応力無し条件を課した場合の計算では、球殻上層と下層の二層構造を持つ新しい弱磁場ダイナモ解が得られた。

このダイナモ解は上下二層の空間的構造により特徴づけられる。上層は、強い順行帯状流と動径外向きに広がった螺旋状の対流渦が支配的である。この螺旋渦は自転と同方向に伝播し、あまり組織化されていない。その一方で、下層は自転と逆向きに伝播する柱状の乱流対流渦

が支配的である。上層の強い帯状流は下層で形成された磁場が球殻表面に表れることを妨げている。この弱磁場ダイナモ解の磁場生成過程を調べるために、下層と上層それぞれの伝播速度で経度方向に移動する座標系で時間平均をとり、上層と下層それぞれの速度場と磁場の特徴的な構造を抽出することに成功した。さらに、この弱磁場ダイナモ解の運動エネルギーと磁気エネルギーの収支解析を行ない、運動および磁気エネルギーのトロイダル成分とポロイダル成分のエネルギー変換を明確にした。これらの解析を合わせることで運動エネルギーのトロイダル、ポロイダル成分が磁場のトロイダル、ポロイダル成分へと変換される領域を特定した。球殻下層において、対流渦によるトロイダル磁場の磁力線の引き伸ばしによって渦状のポロイダル磁場が生成される。この渦状の磁力線が間欠的に上層に貫入する対流運動によって持ち上げられ、球殻上層の螺旋渦に巻き込まれ引き伸ばされてトロイダル磁場が形成される。このトロイダル磁場が間欠的に下層に落ちてきて内側領域の対流渦に引き込まれ、再び渦状のポロイダル磁場を形成する。これらの過程を繰り返すことで自励的な磁場が生成維持されている。

この新しい弱磁場ダイナモ解は、天体表面における磁場が弱い場合であっても、天体内部では活発に磁場が生成維持されている可能性があることを示唆している。天体内部の磁場は観測できないため、その大きさについては未だ良くわかっておらず、場合によっては、表面での磁場活動に比べて内部の磁場活動が強い天体が存在するかもしれない。また、新しい弱磁場ダイナモ解の存在は、ダイナモ解が初期磁場の大きさに依存することは天体固有磁場の形成初期段階で「磁場の種」として外部から与えられる磁場によって、現在の磁場の構造が変わる可能性を示している。

これを要するに、著者は、惑星ダイナモの振る舞いの力学的境界条件依存性について新たな新見を得たものであり、天体内部構造の理解に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。