

平成 21 年 4 月 28 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17540412
 研究課題名（和文） 外側安定成層を伴う回転球殻中の熱対流および磁気流体ダイナモの研究
 研究課題名（英文） Thermal convection and MHD dynamo in a rotating spherical shell associated with an outer stably stratified layer
 研究代表者
 竹広 真一（TAKEHIRO SHIN-ICHI）
 京都大学・数理解析研究所・准教授
 研究者番号：30274426

研究成果の概要：外側に安定成層を伴う回転球殻内の熱対流および磁気対流ダイナモの数値実験を通じて、以下のような流れの性質が新たに見いだされた。1) 安定成層内での 2 次元的な乱れた流れは極周辺に西向きジェットを形成し、その強さと幅は回転角速度の $1/4$ および $-1/4$ 乗に比例する。2) 強い安定成層の存在によって、対流運動が生成する赤道外側領域での帯状流は回転とは逆向きになる。3) 回転軸に平行な磁場の存在は対流運動の安定成層への貫入を助長する。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	1,500,000	0	1,500,000
2006年度	600,000	0	600,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,400,000	390,000	3,790,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：木星型惑星大気、地球流体核、回転球殻、熱対流、安定成層、貫入対流

1. 研究開始当初の背景

最近の Galileo 探査機観測の結果から、木星の帯状流が深部の対流運動に起因する説が有力視されている。しかしながら一方で、木星大気の外側の部分には成層安定な大気層が存在することが観測やモデルから示唆されている。そのため深部の対流がどの程度安定成層をつき抜けて帯状流を生成し得るかが木星の帯状流の成因を特定する上での一つの鍵となっている。

地球中心核においても同じような安定成層への対流の貫入の問題がある。流体核の外側コアーマントル境界付近に安定成層が

存在する可能性が 20 年前から示唆されており、地球磁場変動のある成分がその層に起因するという議論がされてきている。この場合もやはり深部の対流がどの程度安定成層を削るかがその層の存在を判断する重要な要素となっている。

そこで、本研究では上側境界付近に安定密度成層が存在する場合の回転球殻内の熱対流および磁気対流ダイナモおよび安定成層内流れの性質を調べることにより、上記のような惑星大気や中心核の成層構造に関する基本的な問題に地球流体力学的観点から取り組むたいと考えた。

2. 研究の目的

本研究にて明らかにしようとした地球流体力学の問題は以下の4項目であった。

(1) 回転球殻上層の安定成層内の2次元流の基本的性質

回転球殻内の外側安定成層内の流れに注目して、回転する球面上の非圧縮2次元流体の減衰性乱流を調べ、出現する東西流ジェットの性質を解明することを目標とした。これにより木星型惑星大気の帯状流の成因を安定成層内の流体運動の性質に帰する場合のメカニズムを明らかにすることを目指した。

(2) 有限振幅対流の安定成層への貫入と平均帯状流生成

3次元モデルを用いた数値計算を行い、有限振幅の熱対流と引き起こされる平均帯状流の安定成層へ貫入する様子を調べ、これを目標とした。対流運動と平均帯状流の貫入の程度がパラメータによってどのように変化し定まるのかを明らかにすることで、木星型惑星大気の帯状流の成因とメカニズムを理論的な立場から制約することを目指した。また、観測結果と組み合わせ、良く定められていない惑星深部の力学的状況を定めることができることを期待した。

(3) 磁場の存在下での電気伝導性流体の熱対流(磁気対流)の安定成層への貫入

対流運動と平均帯状流の貫入の程度が磁場の強さや安定成層の強さあるいは対流の強さなどのパラメータによってどのように変化し定まるのを明らかにすることを目指した。その結果により地球中心核の安定成層の存在を力学的に議論できるようになることを期待した。さらに、地球磁場を生成維持しているであろうダイナモ過程へ安定成層の存在がどのように影響するかを考えるための基礎的な知識を得ることを期待した。

(4) 磁気流体ダイナモに対する安定成層の影響

回転球殻中の磁気流体ダイナモモデルを用いて数値的にパラメータ実験を行い、上部に安定成層が生じる状況での磁場の維持生成の様子を調べて安定成層のダイナモ過程への影響を調べることを目指した。

3. 研究の方法

(1) 外側安定成層内の2次元流の基本的性質

非常に薄い安定成層中の2次元流体運動をモデル化した回転する球面上の非圧縮2次元流体モデルを用いて、初期に散り

ばめられた沢山の小規模渦の時間発展を数値的に計算することで回転の下での2次元減衰性乱流の基本的な性質を調べた。スペクトル法を用いたモデルプログラムを用いてこれまでに取り扱われてきた研究よりも系の回転角速度を2桁ほど大きい場合(ロスビー数1/1000)まで扱い、回転が大きい極限での流れの時間無限大での漸近的な性質を見いだすことをめざした。全運動エネルギーが等しく位相の異なる25通りの初期状態からはじめて東西平均運動エネルギーの時間変化が落ち着くまでに十分に長く時間積分を行い、最終状態をアンサンブル平均した流れ場を解析した。

(2) 安定成層の存在下でのより強い有限振幅の熱対流

研究代表者は既に高速回転球殻中のテイラー柱型対流の安定成層への貫入距離を理論的に導出しており、数値計算による臨界対流の構造と比較し正当性を確かめていた(Takehiro and Lister 2001, 2002)。この結果をふまえて、3次元モデルを用いた数値計算を行い、有限振幅の熱対流と引き起こされる平均帯状流が安定成層へ貫入する様子を調べた。それらの結果を理論と比較し解釈することで貫入のメカニズムを考察することを試みた。レイリー数をこれまでの値よりも大きくした場合の対流と、それによって引き起こされる安定成層内の流れの様子を調べ、臨界対流の場合に用いた理論的手法による予想と比較して理論の有効性を吟味した。この問題の枠組では登場するパラメータの数が多く、通常の回転球殻対流のものに加えて安定成層の強さが加わる。全てのパラメータに対する依存性を調べることは研究期間内だけでは不可能であると判断し、成層の安定度と回転角速度および対流の強さの指標となるレイリー数に注目して、それら変化に対する依存性を調べた。熱拡散と粘性の比を表すプラントル数は渦粘性と熱拡散を意識して1、内外半径比は中心核の状況に近い0.4程度、回転の効果を表すエクマン数は1/1000に固定した。これまでの研究ではレイリー数を対流開始時の値である臨界値の4倍程度までしか扱っていない。一方で、安定成層を伴わない状況での回転球殻熱対流計算ではレイリー数が臨界値の百倍程度の計算例がある。本研究ではこれまでの結果に基づいてレイリー数を徐々にあげてレイリー数が臨界値の数倍から数十倍程度の場合の計算を行った。

(3) 安定成層の存在下での臨界磁気対流

上層安定成層を伴う回転球殻中の磁気対流の臨界状態を数値的に求め、磁場の影響を受けた柱状の対流運動の安定成層への貫

入を考察した．特に磁場の強さの指標となるエルサッサー数に注目して，その変化に対する貫入の程度の依存性を調べた．外部から与える基本場の磁場は球殻の回転軸方向と平行な一様磁場を用いた．熱拡散，磁気拡散と粘性の比を表すプラントル数および磁気プラントル数は渦拡散過程を考慮して 1 に，内外半径比は地球中心核の状況に近い 0.4，回転の効果を表すエクマン数は $1/100000$ に固定した．エルサッサー数を徐々に増加させ基本場の磁場を次第に強くしていきながら臨界対流を計算しそれらの構造の変化を観察した．

(4) 安定成層の存在下での磁気流体ダイナモ

安定成層下の回転球殻中の磁気流体ダイナモを調べるために，まず安定成層直下での力学的境界条件を変化させて，内部で磁場を発達維持させる対流計算を行い，ダイナモ過程を調べることを行った．その際，安定成層を伴わない状況でのダイナモベンチマークでの解から始めて，その設定パラメーターの下で上部の力学境界条件を変更することで，自発的に発達するダイナモ解を求めていった．特に，エクマン境界層からの流れとヘリシティ生成(アルファ効果)，あるいは帯状流によるポロイダル成分からトロイダル成分への変換過程(オメガ効果)が，上端の力学的境界条件によりどのように変わるかを吟味した．

4. 研究成果

(1) 安定成層内の 2 次元的流れの性質

数値実験の結果から，極での西向き周極流と中低緯度での縞状構造が出現し，回転が大きくなるにつれてその幅がせまくなるという興味深い傾向がとらえられた．さらに，この周極流の幅と強さの回転角速度との関係がそれぞれ回転角速度の $-1/4$ 乗および $1/4$ 乗に比例することを発見した．

また，回転角速度の大きさによらず，東西流のバンド構造と西向き周極ジェット流への緯度方向の不均一な運動エネルギーの集積が見いだされた．長時間積分の間，東西流のバンド構造は比較的初期の段階で生成される．これに対して後の長い時間の間には中低緯度のバンド構造はもはや発達せず，周極流のみがゆっくりと強化されていき，運動エネルギーが集中していく．ロスビー波の持つ作用の緯度方向フラックスを解析した結果から，この西向き周極流は西向き運動量を持つロスビー波が赤道から極方向へ伝播し極域で吸着されることで形成されることが確認された．

不均一な運動エネルギーの集積の程度は

系の回転角速度とともに増加し，高速回転の状況ではほとんど全ての運動エネルギーが周極流に集中する．この回転角速度の変化による運動エネルギーの集積および周極流の強さと幅の変化を記述する理論モデルを，次の 2 つの仮定：

① 周極流の中心緯度は局所的なラインズスケール(非線形項とコリオリ力の緯度傾度項が同程度となるスケール)と極からの距離が同じになる緯度であること，

② 周極流よりも低緯度側に初期に存在している渦が周極ジェットの生成に全て寄与すること，

から構築した．このモデルによって数値計算の結果から見出されたスケール則の理論的な裏づけを行うことに成功した．

(2) 安定成層の存在下でのより強い有限振幅の熱対流

系統だった数値実験の結果から以下の知見が新たに得られた．

① 強い安定成層の存在は赤道逆行流の生成を助長する．安定成層のない通常の回転球殻対流の場合，臨界値の数十倍程度の範囲においてレイリー数によらず引き起こされる帯状流が赤道上端で順行流となることが知られている．しかし外層に強い成層安定度が存在するときには，レイリー数を臨界値の十倍程度に大きくすると，赤道上端での帯状流が逆行流となる．このとき深部の対流は規則的なテイラー柱状渦ではなく乱流的であるが依然として安定成層を浸食していない．

② 安定成層の存在は対流運動を上端領域で禁止し対流領域の内外半径比を大きくするのに加えて，対流領域上端境界の力学条件として粘着条件と自由すべり条件の中間的な条件を与える効果を持つ．

(3) 安定成層の存在下での臨界磁気対流

基本場の磁場を次第に強くして臨界対流を計算していったところ，柱状対流が安定成層下へ補足されている状態から安定成層へ大きく貫入する状態へと遷移する傾向が見出された．状態が遷移する磁場の強さはエルサッサー数が 1 程度のところであった．この結果から，磁場の存在が安定成層への対流運動の貫入を助長することが明らかになった．

このような傾向を理論的に解釈するために磁場のない場合を扱った Takehiro and Lister (2001) と同じアプローチを試みたが，残念ながら安定成層内の磁気慣性重力波の分散関係から貫入の程度の磁場依存性を説明することができなかった．

(4) 安定成層の存在下での磁気流体ダイナモ

上端を粘着条件から応力なし条件に変更すると、ダイナモ作用の維持が困難になる傾向が見出されたが、出現する磁場の構造は粘着条件の場合と大きな変化が見られなかった。ポロイダル磁場からトロイダル磁場への変換にはオメガ効果は寄与していなかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

① Shin-ichi Takehiro, Physical interpretation of spiraling-columnar convection in a rotating annulus with radial propagation properties of Rossby waves, *Journal of Fluid Mechanics*, 614, 67-86 (2008) 査読有

② 竹広真一, 山田道夫, 林祥介, 上層の安定成層下に閉じ込められた高速回転する球殻内の超臨界対流により引き起こされる赤道逆行流, *ながれ*, 27 別冊, 375-375 (2008) 査読無

③ 佐々木洋平, 竹広真一, 林祥介, 倉本圭, 回転球殻 MHD ダイナモにおける力学的境界条件の影響, *ながれ*, 27 別冊, 376-376 (2008) 査読無

④ Yoshi-Yuki Hayashi, Seiya Nishizawa, Keiichi Ishioka, Shigeo Yoden, Shin-ichi Takehiro, Michio Yamada, Rossby waves and jets in a two-dimensional decaying turbulence on a rotating sphere, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64, 4246-4269 (2007) 査読有

⑤ Shin-ichi Takehiro, Michio Yamada, Yoshi-Yuki Hayashi, Energy accumulation in easterly circumpolar jets generated by two-dimensional barotropic decaying turbulence on a rapidly rotating sphere, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64, 4088-4101 (2007) 査読有

⑥ Shin-ichi Takehiro, Michio Yamada, Yoshi-Yuki Hayashi, Circumpolar jets emerging in two-dimensional non-divergent decaying turbulence on a rapidly rotating sphere, *Fluid Dynamics Research* (2007) 査読有

⑦ 竹広真一, 山田道夫, 林祥介, 高速に回転する球面上の 2 次元順圧減衰性乱流, *京都大学数理解析研究所講究録*, 1483,

62-71 (2006) 査読無

⑧ 竹広真一, 山田道夫, 林祥介, 高速に回転する球面上の 2 次元順圧減衰性乱流, *ながれ*, 24 別冊, 277-277 (2005) 査読無

[学会発表] (計3件)

① 竹広真一, 山田道夫, 林祥介, 上層の安定成層下に閉じ込められた高速回転する球殻内の超臨界対流により引き起こされる赤道逆行流, 日本気象学会 2008 年度秋季大会, 2008 年 11 月 21 日, 仙台国際センター

② 佐々木洋平, 竹広真一, 林祥介, 倉本圭, 下端に粘着条件・上端に応力無し条件を課した回転球殻 MHD ダイナモ計算, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 28 日, 幕張メッセ国際会議場

③ 竹広真一, 山田道夫, 林祥介, 上層の安定成層下に閉じ込められた高速回転する球殻内の超臨界対流により引き起こされる赤道逆行流, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 27 日, 幕張メッセ国際会議場

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹広 真一 (TAKEHIRO SHIN-ICHI)
京都大学・数理解析研究所・准教授
研究者番号: 30274426

(2) 研究分担者

山田 道夫 (YAMADA MICHIO)
京都大学・数理解析研究所・教授
研究者番号: 90166736
(平成 17 年度~20 年度)
林 祥介 (HAYASHI YOSHI-YUKI)
神戸大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 20180979
(平成 17 年度~19 年度)

(3) 連携研究者

林 祥介 (HAYASHI YOSHI-YUKI)
神戸大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 20180979
(平成 20 年度)