

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540416

研究課題名(和文) 歳差回転球内流れの基本特性の解明とその応用

研究課題名(英文) Fundamental Properties of Flows in a Precessing Sphere

研究代表者

木田 重雄 (KIDA, Shigeo)

同志社大学・研究開発推進機構・嘱託研究員

研究者番号：70093234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：歳差回転球内の非圧縮粘性流体の流れの様相は、球の半径、自転角速度、歳差角速度および流体の動粘性係数で定義される2つの無次元パラメータ(レイノルズ数とポアンカレ数)によって特徴付けられ、層流から乱流まで、多様に変化する。本研究では、この流れの最も基本的な特性のひとつとして、定常流に着目し、その構造と存在条件を詳しく調べた。特に、歳差が強い場合には、歳差軸に直交する大円の近傍(臨界帯)に局在する1対の細長い渦の構造を漸近解析によって求めた。また、定常流が安定に存在する範囲をパラメータ平面の全体にわたって特定した。さらに、速度場の空間構造が不規則に反転を繰り返すという興味深い現象を観測した。

研究成果の概要(英文)：An incompressible viscous fluid in a precessing sphere exhibits a variety of states from laminar to turbulent flows, depending upon two non-dimensional parameters (the Reynolds number and the Poincare number) defined in terms of the sphere radius, the spin angular velocity, the precession angular velocity and the kinematic viscosity of fluid. Here, we examined the structure and the existence condition of the steady flow. An asymptotic analysis was performed to obtain the structure of a pair of vortices localized in the vicinity of the great circle perpendicular to the precession axis. We determined the existence boundary of the steady flow over the whole parameter space by means of direct numerical simulation and asymptotic analysis. Moreover, a series of random reversals of the velocity field was observed.

研究分野：流体物理学

キーワード：歳差回転球 安定性 臨界帯 不規則反転

1. 研究開始当初の背景

(1) 一定角速度で回転(自転)する中空の球の中の流体は遅かれ早かれ常に球とともに回転する剛体回転流に落ち着く。ところが、この回転球の回転軸そのものに別の一定回転(歳差)を加えると球内の流体の運動の様相は層流から乱流まで多様に変化する。このように回転軸が時間的に変化する球を歳差回転球という。歳差回転球内流れの本格的な研究が始まったのは、1968年にMalkusが地磁気の成因を地球内部の外核の熔融鉄のダイナモ作用に求めて行った実験研究からである。地球は周期1日で自転しており、その自転軸が25800年の周期で、自転軸と -23.5° の角をなす軸のまわりに回転している。この極めてゆっくりとした歳差運動は、数十億年という長い時間をかけて地球内部の外核を構成する熔融鉄の流れを引き起こし、ダイナモ作用によって地磁気を形成するという。この歳差ダイナモ理論を検討するために、これまで、理論解析や室内実験、数値シミュレーションによる歳差回転球内流れの基礎研究が多数なされてきている。

(2) 上述のように、歳差回転球内流はダイナモ作用の研究の簡単なモデルとして魅力的であるが、われわれは別の観点からこの系に着目した。すなわち、容器の形状(球)も流れの駆動機構(一定角速度の2つの回転)も極めて単純であるこの系は、流体力学の基礎的で重要な流れに思えるが、文献を調べてみると、意外にも、この流れの体系的な研究は未だなされていないのである。そこで、われわれは、この基礎的で重要な系における流れの流体力学的特性の全容(支配パラメータの全領域に対して)を解明することを志した。

2. 研究の目的

歳差回転球内の流れの運動特性は、初期条件を除けば、レイノルズ数($Re = a\Omega s/\nu$)、ポアンカレ数($\Omega_p/\Omega s$)および自転軸と歳差軸の交角の3つのパラメータにより完全に決定される。ここに、 a は球の半径、 Ωs は自転角速度、 Ω_p は歳差角速度、 ν は流体の動粘性係数である。これらの3つのパラメータの全領域にわたって、歳差球内流れの基本特性(流れの空間構造およびその安定性と分岐、層流から乱流への遷移、等々)を理論解析、室内実験、および直接数値シミュレーションの3つのアプローチで解明し、乱流混合やMHDダイナモ作用の研究に応用することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究は、理論、実験、計算の3つのアプローチで研究を進める。歳差回転球内流れの支配パラメータ(レイノルズ数、ポアンカレ数、自転軸と歳差軸の交角)の全領域にわたって相図を完成させることを目指して、定常

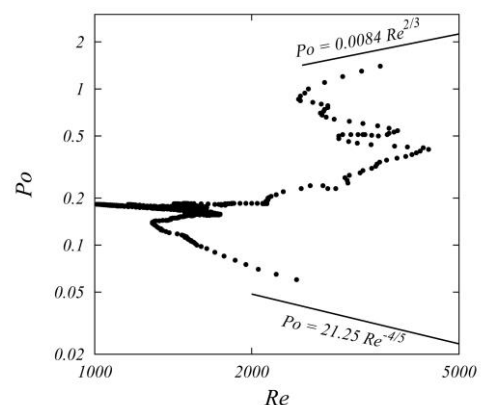
流の線形安定特性(臨界曲線、不安定モード)を有限のレイノルズ数については数値計算で、レイノルズ数の大きい極限における振る舞いについては漸近解析で理論的に求める。また、超臨界における流れの変動特性(空間構造や時間変動、ヒステリシス、乱流構造)を弱非線形解析、直接数値シミュレーションおよび実験によって調べる。

4. 研究成果

(1) 定常流の存在領域: 自転角速度や歳差角速度が小さい(レイノルズ数 $Re \ll 1$ 、ポアンカレ数 $Po \ll 1$) 場合には、流れはほぼ剛体回転する定常流であることは自明であるが、両角速度が大きくなると流れは非定常となり、複雑な乱流に遷移する。定常流の存在するパラメータ領域の特定は、歳差回転球内流れの振る舞いを理解する上で最も基本的で重要である。われわれは、定常流の存在境界を、有限のパラメータ値に対しては数値シミュレーションで、そしてパラメータ値が極めて大きいかまたは小さい場合には漸近枝を理論的に求めた(図1)。定常流の存在境界の特定はこれが初めてであり、これが歳差回転球内流れの研究の基準になるべきである。

なお、当初は予期していなかったことであるが、定常流の存在境界の近傍(Re, Po)=(1550, 0.165)で速度場の空間構造が不規則反転を繰り返すという興味深い現象を発見した。このメカニズムの解明は今後の課題である。

図1: 定常流の存在境界。黒点の左側が定常流で右側が非定常流。2つの直線は漸近枝。



(2) フレークの明暗模様: 歳差回転球内流れの構造をフレーク(扁平な粒子)を用いて可視化実験をしていたところ、(Re, Po)=(80000, 0.002)の場合に、図2(a)のような不思議な模様が観察された。この模様を数値シミュレーションで再現し(図2(b))、摂動展開を用いて理論的に導出した(図2(c))。この研究で、フレークの可視化で見えるものは、流れ

の局所的な構造ではなく、フレークの軌道にわたる大域的な性質であることが明らかになった。また、実験で用いたフレーク（広がり大きさ数十マイクロ）の向きの流れによる変動にはブラウン運動が無視できないことを発見し、フレークの運動方程式を基礎方程式から理論的に導出したことは望外の喜びである。

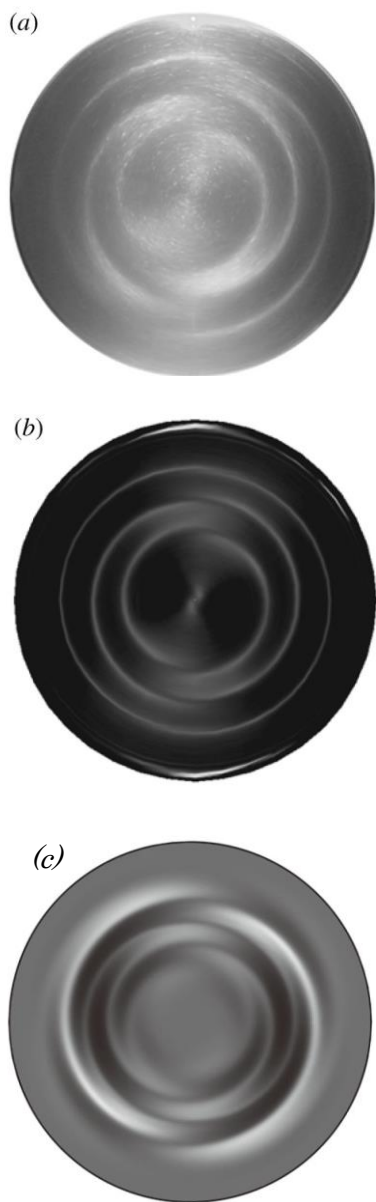


図2：フレークの明暗模様。(a)実験、(b)数値シミュレーション、(c)理論。(Re, Po)=(80000, 0.002).

(3) 定常流の構造：歳差回転球の定常流の構造は真に3次元で、これの解析的表現を得ることは困難である。われわれは、以前に、歳差が弱い極限において球全体で適用できる表現を求めている。これに対して、今回は、歳差が強い極限において球内全体で適用できる表現を導出した。球面に沿って薄い境界

層ができるが、歳差軸に垂直な大円上で境界層近似が破綻し、その近傍で境界層とは異なるスケーリング則をもつ帯状のリング（臨界帯）が現れ、そこに流線の閉じた1対の渦が局在することを示した（図3）。

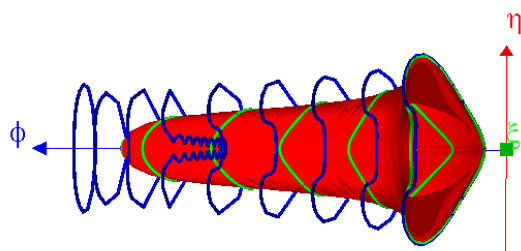


図3．臨界帯渦。緑と青の曲線は流線、赤い面は流線面を表す。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Shigeo Kida, Theoretical prediction of bright pattern of reflective flakes in a precessing sphere. Fluid Dynamics Research, **46** (2014) 061404. 査読有
- ② Susumu Goto, Arihito Matsunaga, Masahito Fujiwara, Michio Nishioka, Shigeo Kida, Masahiro Yamato, Shinya Tsuda, Turbulence driven by precession in spherical and slightly elongated spheroidal cavities. Physics of Fluids, **26** (2014) 055107. 査読有
- ③ Susumu Goto, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Turbulent mixing in a precessing sphere. Proc. Eighth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena. **1** (2013) 4D1-4D4. 査読有
- ④ Shigeo Kida, Motion of a small flat plate in a viscous flow. Fluid Dynamics Research, **45** (2013) 025503. 査読有
- ⑤ Shigeo Kida, Instability by weak precession of the flow in a rotating sphere. Procedia IUTAM. **7** (2013) 183-192. 査読有

[学会発表] (計 18 件)

- ① 木田重雄、臨界帯方程式の数値解法、第29回数値流体力学シンポジウム、九州大学、福岡県、2015年12月15日～17日。
- ② 木田重雄、歳差球内流れの定常流—強歳差の極限、日本流体力学会年会2015、東京工業大学、東京都、2015年9月26日～28日。
- ③ Shigeo Kida, Stability of steady flow in a precessing sphere, JJ70 Conference, Salamanca, Spain, 2015 September 3 - 4.
- ④ Shigeo Kida, Boundary-layer instability in a rapidly rotating and strong precessing sphere. Delft, The Netherlands. 2015 August 25 - 28.
- ⑤ Susumu Goto, Laboratory experiments and numerical simulations of flows in a precessing cavities. LIMS seminar, LIMS, France, 2015 March 4.
- ⑥ Shigeo Kida, Linear stability of steady flow in a precessing sphere - Global and local disturbances. 67th Annual meetings of the APS division of fluid dynamics. San Francisco, USA, 2014 November 23 - 25.
- ⑦ Susumu Goto, Transition to turbulence in weakly precessing spherical and spheroidal cavities. France-Japan workshop on transition to turbulence. Osaka University, Osaka, 2014 November 12.
- ⑧ 堀本康文、後藤晋、河原源太、歳差運動をする容器内における界面活性剤水溶液の不安定性、第92期日本機械学会流体力学部門講演会、富山大学、富山県、2014年10月25日。
- ⑨ 堀本康文、後藤晋、河原源太、歳差運動をする容器内における界面活性剤水溶液の乱流の統計、日本レオロジー学会第62回レオロジー討論会、福井市交流プラザ、福井県、2014年10月16日。
- ⑩ Shigeo Kida, Flow instability and turbulence in a precessing spherical and spheroidal cavity, iTi Conference on turbulence VI, Bertinoro, Italy, 2014 September 21 - 24.
- ⑪ Shigeo Kida, The structure of shear layers in a precessing sphere. Vortical structures and wall turbulence, Centro Congressi Villa Mondragone, Rome, Italy, 2014 September 19 - 20.
- ⑫ Shigeo Kida, Instability of steady flow in a precessing sphere. Interscale transfers and flow topology in equilibrium and nonequilibrium turbulence. Sheffield University, Sheffield, England. 2014 September 15 - 16.
- ⑬ Shigeo Kida, Stability of steady flow in a precessing sphere — Global and local disturbances, London Mathematical Society, Imperial College, London, UK, 2014 March 19 -21.
- ⑭ 清水雅樹、小池裕貴、木田重雄、歳差回転する球体内流における乱流リングとMHDダイナモ、プラズマシミュレーターシンポジウム、核融合科学研究所、岐阜県、2013年9月11日～12日。
- ⑮ Susumu Goto, Turbulent mixing in a precessing sphere. Eighth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena. ENSMA, Poitiers, France, 2013 August 29.
- ⑯ 木田重雄、歳差回転球体内の定常流の線形安定性—大域攪乱と局所攪乱、日本流体力学会、東京農工大学、東京都、2013年9月12日～14日。
- ⑰ Shigeo Kida, Localized unstable modes in a precessing sphere. European Turbulence Conference 14, Ecole Normal Supérieure de Lyon, Lyon, France. 2013 September 1 - 4.
- ⑱ 後藤晋、微小な鱗片状粒子による乱流の可視化、第41回可視化情報シンポジウム、工学院大学、東京都、2013年7月16日。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木田重雄 (KIDA, Shigeo)
同志社大学・研究開発推進機構・嘱託研究員
研究者番号：70093234

(2) 研究分担者

後藤晋 (GOTO, Susumu)
大阪大学・基礎工学研究科・教授
研究者番号：40321616

(3) 研究分担者

清水雅樹 (SIMIZU, Masaki)
大阪大学・基礎工学研究科・助教
研究者番号：20550304