

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月11日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760130

研究課題名（和文） 歳差運動する容器を用いた攪拌翼をもたない混合器の開発

研究課題名（英文） Development of a mixer without impellers as an application of a precessing cavity

研究代表者

後藤 晋（GOTO SUSUMU）

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：40321616

研究成果の概要（和文）：こまの首ふり運動のように、回転する物体の自転軸がほかの軸のまわりを回転する運動を「歳差運動」とよぶ。弱く歳差運動をする容器内に流体を充填すると、滑らかな容器内に強く乱れた流れを維持できる。この性質に着目することにより、攪拌翼を用いない新しいタイプの混合器の開発を目指した室内実験や数値シミュレーションによる基盤研究を行った。その結果、歳差容器内に強い乱流を維持する最適なパラメータや容器形状を明らかにすることができた。

研究成果の概要（英文）：The rotational motion of the spin axis of a rotating object is called the “precession”. It has been shown that a weak precession of a cavity can lead to strong turbulence of the confined fluid. Aiming to develop a new type of mixer without impellers on the basis of this feature of precession, we have conducted laboratory experiments and numerical simulations of flow in a precessing sphere and in a spheroid. We have then revealed the appropriate combination of control parameters, and the appropriate shape of the cavity to sustain strong turbulence in a precessing cavity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：流体工学、流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流、歳差、混合、攪拌、室内実験、粒子画像流速測定、数値シミュレーション、スペクトル法

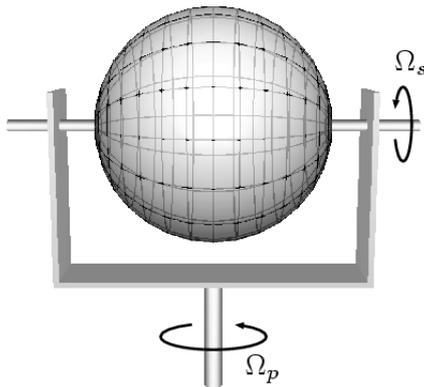
1. 研究開始当初の背景

乱れた流れは強い混合能力を有する。一般に乱流は強いせん断から生成されるので、多くの混合器では攪拌翼を用いて乱流を生成し、混合を促進する。この方法は直感的にも理に適っているが、そのような混合器の効率は攪拌翼の形状や運動速度あるいは容器形状などさまざまなパラメータに複雑に依存するので、その最適化や制御は必ずしも容易で

はない。また、攪拌翼のメンテナンスや攪拌翼による被混合物の損傷などが問題となることもある。このため、もしも攪拌翼を用いずに、しかもその混合効率が容易に制御可能な混合器が開発できればその意義は大きい。

ところで、これまで我々は歳差運動（自転軸がほかの軸まわりを回転する運動）をする容器（以下、歳差容器とよぶ）内の流体運動に関する室内実験を行ってきた。とくに容器

として球体を用い、また自転軸と歳差軸が直交する特別な場合（図1）に対する系統的な室内実験を行った結果、この歳差球体内部の流体運動は、非常に弱い歳差であっても非常に強い乱流となることが明らかとなった（Goto *et al.* 2007）。具体的には歳差の強さ（歳差の角速度の大きさの自転の角速度に対する比 $\Gamma = \Omega_p / \Omega_s$ ：以下、ポアンカレ数とよぶ）が $O(0.01)$ の非常に弱い歳差でも流れは乱流となる。この結果は攪拌翼を用いることなしに、強い乱流を維持できることを示唆しており、歳差容器を用いた新しいタイプの混合器の開発が期待される。



〔図1：歳差運動をする球体容器。角速度 Ω_s で回転する容器全体が、別の軸のまわりを一定角速度 Ω_p で回転する〕

2. 研究の目的

前項に述べた背景のもと歳差容器を用いた新しいタイプの混合器の開発のために必要な基礎データを取得することを目的とする。

具体的には、これまでは定性的にしか分かっていなかった容器内に維持される乱流の統計量（乱流強度や時間平均流速場、あるいは乱流レイノルズ数など）のパラメタ依存性を、精確な室内実験計測と数値シミュレーションを併用することで明らかにし、強い乱流の維持のための最適条件を求めることを第一段階の目標とする。

次に、従来まで球体容器を用いてきたが、球体容器内の流れは壁面からの粘性応力のみによって駆動されるため、乱流維持の観点から必ずしも最適ではない可能性がある。そこでより対称性の低い容器を用いた実験を遂行し、乱流が維持される条件の容器形状依存性を明らかにすることを次の目標とする。

最後に、歳差容器内の乱流がどの程度の混合の効率を持つかを定量的に明らかにすることを目的として、数値シミュレーションにより混合過程の詳細を解明する。

3. 研究の方法

歳差容器内の流れは単純な境界条件により駆動されるので、室内実験と数値シミュレーションによる研究を並行して行えるという特長がある。そこで本研究でも目的に応じてこれらを併用した。それぞれの具体的な方法は以下の通りである。

(1) 室内実験では一定の角速度 Ω_p （図1参照）で回転するターンテーブル上で容器を一定の角速度 Ω_s で回転させることで歳差運動を実現した。また内部流体の速度場の計測は高強度のレーザーと高速度カメラを用いた粒子画像流速測定（PIV）により行った。このとき回転系での計測を精確に行うための工夫をいくつか施した。まず大型のレーザー発振装置を回転台上に搭載するのは困難であるため、実験室に固定した装置からレーザービーム光を回転台の回転軸に沿って入射し、これを回転台に固定したシリンドリカルレンズによりシート光に変換した。この工夫により高強度のレーザーの使用が可能となった。次に入射光やトレーサ粒子からの散乱光の屈折による精度の低下を防ぐため、容器の外部形状は円筒形とし、大きな軸受を用いてその平滑な底面に測定用の窓を設けることで屈折の問題を回避した。また、作動流体の温度管理（動粘性係数の管理）は容器に埋め込んだサーミスタを用いて徹底的に行った。

なお、容器形状としては従来までの研究でも用いてきた球体容器に加えて、自転軸方向を長軸としこの軸まわりに軸対称な回転楕円体容器を用いた実験も併せて行った。

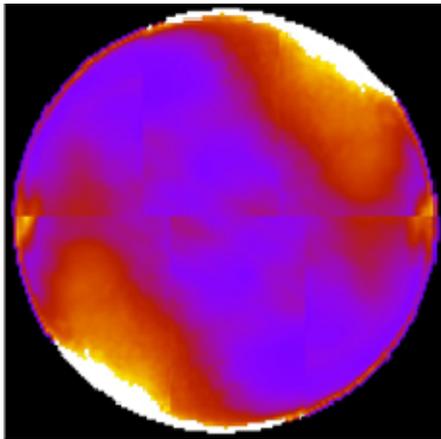
(2) 一方で数値シミュレーションは、流体の支配方程式（運動方程式と連続の式）を容器の内壁面における粘着境界条件のもと数値的に時間積分することで行った。このとき空間微分はスペクトル法によった。展開関数としては球座標の角度方向には球面調和関数、半径方向にはゼルニケ球多項式とよばれる関数を用いた。時間発展は2次精度のアダムス・バッシュホース法およびクランク・ニコルソン法を併用した。なお、数値シミュレーションはおもに宇宙航空研究開発機構のスーパーコンピュータを用いて実行した。

4. 研究成果

(1) 歳差容器の形状とおよび歳差軸と自転軸との間の角度を決めてしまえば、歳差容器内の流れは、自転角速度 Ω_s と容器の大きさ（球体の場合には半径、回転楕円体容器の場合には短軸半径） a および流体の動粘性係数 ν で決定されるレイノルズ数 $Re = a^2 \Omega_s / \nu$ と、歳差の強さを表すポアンカレ数 $\Gamma = \Omega_p / \Omega_s$ の2つのパラメタのみに支配される。

そこでこれら2つのパラメタの組み合わせ

せを変化させて室内実験を遂行し、自転軸に垂直な中心断面内の平均流速場と乱流強度分布を計測した。例として $Re=10^4$ および $\Gamma=0.1$ の場合の乱流強度分布の計測結果を図2に示す。断面内の右上と左下に乱流強度が大きい特徴的な領域が存在することが観察される。しかも、これらの領域はレイノルズ数 Re を変化させても、ポアンカレ数 Γ を一定に保てばいつでも同じように観察されることが明らかとなった。



[図2：自転軸に垂直な中心断面における乱流強度分布。レイノルズ数 $Re=10^4$ 、ポアンカレ数 $\Gamma=0.1$ 。室内実験。赤い部分が乱流強度の強い領域を表す]

実際、この歳差強さ ($\Gamma=0.1$) に限らず、乱流強度や時間平均流の空間構造は2つのパラメタ (Re, Γ) のうちポアンカレ数 Γ のみに依存することが明らかとなった。この結果は歳差容器内に維持される乱流の大規模構造が慣性系からみた容器の回転運動の形態にのみ依存することを示唆し、歳差容器内流れのパラメタ依存性を考える上で重要な知見を与える。

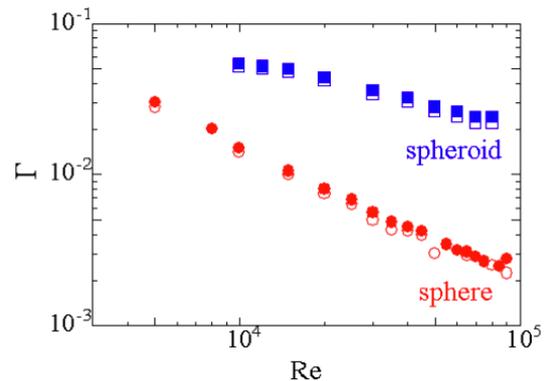
(2) 次に歳差容器内に乱流が維持される条件の容器形状への依存性を室内実験により調べた。すなわち鱗片状粒子をトレーサーとして作動流体に混入することによる可視化実験(下の(5)を参照)を遂行し、乱流が維持されるための最低のポアンカレ数 Γ の容器形状依存性を明らかにした。具体的には球体と回転楕円体容器を用いた比較実験を行った。ただし回転楕円体容器は長軸が自転軸に一致する楕円率0.9のものを用いた。

興味深いことに、このわずかな楕円率は結果に大きな影響を与え、しかも乱流維持のためには回転楕円体の方がより大きなポアンカレ数を要することが分かった(図3を参照)。

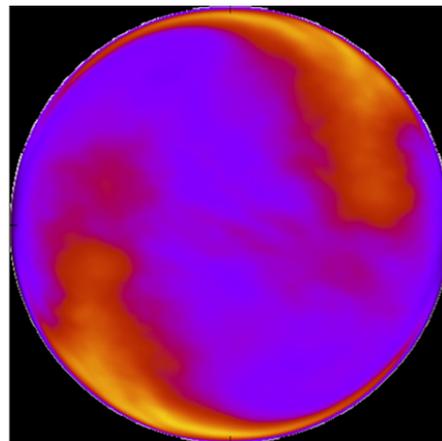
このことは、より対称性の高い容器の方がより容易に乱流を維持できることを意味す

る。これは(壁面での垂直応力が流れを駆動できる回転楕円体の方がより乱流を維持しやすいであろうという)実験前の予想を覆す結果であり、歳差容器を用いた混合器の開発において重要な知見となる。

なお、この結果は地球物理の立場からも意義がある。なぜならば地球の自転軸は非常にゆっくりと歳差運動をしており、この弱い歳差が地球内部の融解鉄の乱流化に寄与するかどうかは40年以上にわたり議論されてきたからである。本研究の結果は地球コアの楕円率が内部流の乱流化へ大きな影響を与える可能性を示唆する。



[図3：歳差容器内に非定常流が維持される最低のポアンカレ数 Γ のレイノルズ数 Re 依存性。赤色が球体容器。青色が回転楕円体容器の場合の結果。同じレイノルズ数 Re であれば回転楕円体の方がより大きい $\Gamma(=\Omega_p/\Omega_s)$ 、つまりより強い歳差が非定常流の維持には必要である]



[図4：図2と同一の条件下での数値シミュレーションによる乱流強度分布]

(3) スペクトル法を用いた数値シミュレーションを実行した。とくに室内実験により強い乱流が維持されることが知られるパラメタ(レイノルズ数 $Re=10^4$ 、ポアンカレ数 $\Gamma=0.1$)における数値シミュレーションを行った。その結果、たとえば室内実験で得られ

る自転軸に垂直な中心断面内の乱流強度分布(図4)を求めると室内実験結果をよく再現することが確かめられた。これは(2)で得られた室内実験結果の妥当性を補強する。また、室内実験での断面計測で明らかになった強乱流領域(図2の赤色で示す領域)が環状の3次元構造を有することも明らかになった。これは歳差容器内の乱流維持機構の解明のための基盤を与える。

(4) 歳差容器内の流れの混合能力の評価を室内実験のみから行うことは困難であるので、(3)で用いた数値シミュレーションによりその評価を行った。具体的には容器内に移流される多数の流体粒子群の運動を流体運動とともにシミュレートしその混合度の時間依存性を評価した。その結果、上述の支配パラメタの組み合わせ(レイノルズ数が $Re=10^4$ 、ポアンカレ数が $\Gamma=0.1$)では約10自転周期程度という短い時間で容器内に一様な混合が達成されることが明らかとなった。

(5) さらに歳差容器内の流れに関する室内実験と数値シミュレーションとが厳密に同一の境界条件で行えるという特長を活かして、以下に示す流れの可視化に関する基盤的な研究も行った。

従来から流れの簡便な可視化法として、光をよく反射する鱗片状の粒子(たとえばアルミ粉やコーティングされた雲母粒子など)が広く用いられてきた。たとえば我々の室内実験においても、図3に示した流れの定常状態と非定常状態とを判別するための簡便な方法として鱗片状粒子を用いた可視化(例を図5に示す)を行った。

しかしこうして可視化されたパターンが流れのどのような特徴を反映するのかは、一般にはよく理解されていなかった。そこで我々は鱗片状粒子を厚みが無限小の楕円体粒子として扱いその支配方程式を導出した。この支配方程式に基づいて粒子群の運動を数値シミュレーションにより求め、たとえば図5に示す室内実験と同じ条件でレーザー光を照射した場合の可視化の様子を模擬した。結果を図6に示す。この数値シミュレーション結果(図6)は、同一条件の室内実験で観察される可視化パターン(図5)を極めてよく再現することが分かる。したがって、導出した鱗片状粒子の支配方程式の妥当性が強く示唆される。

なお、この支配方程式によれば、鱗片状粒子の配向は、(慣性をもたない)無限小の流体面素の配向と同一の時間発展をすることが簡単に示される。つまり、鱗片状粒子を用いて可視化されるパターンは(流跡線に沿った速度勾配の積分に依存して決まる)鱗片状

粒子の配向により決定されることが明らかになった。

上述のように鱗片状粒子による可視化は流体力学実験で広く用いられる手法であるので、この研究成果は流れの可視化に関する重要な基盤研究である。



[図5: 鱗片状粒子による流れの可視化。 $Re=8 \times 10^4$ 、 $\Gamma=0.002$ 。室内実験。流れは定常流であり、定常なパターンが可視化される]



[図6: 図5に示す室内実験と同一条件における数値シミュレーション結果。室内実験における可視化を極めてよく再現している]

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5件)

① Susumu Goto, Shigeo Kida, Shohei Fujiwara, Flow visualization using reflective flakes, Journal of Fluid Mechanics, 査読有, Vol. 683, 2011, 417-429.

② Susumu Goto, Shigeo Kida, Turbulence

visualization using reflective flakes, Journal of Physics: Conference Series, 査読無, Vol. 318, 2011, 052030

③ Susumu Goto, Masahiro Fujiwara, Masahiro Yamato, Turbulence sustained in a precessing sphere and spheroids, Proc. Seventh International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 査読無 2011, USB.

④ Susumu Goto, Turbulent energy cascade caused by vortex stretching, Advances in Turbulence, 査読無, Vol. 12, 2009, 269-272.

〔学会発表〕(計 30 件)

① 田 敏幸司、後藤晋、歳差球体内に維持される乱流の直接数値シミュレーション、日本機械学会中国四国支部第 50 期講演会、2012 年 3 月 8 日、広島大学

② 藤原昌弘、後藤晋、山登将宏、歳差運動をする球体および回転楕円体容器内の乱流、京都大学数理解析研究所共同研究集会「乱流の普遍性と個別性：流体乱流を通して宇宙を見る」、2012 年 1 月 13 日、京都大学

③ Susumu Goto, Multi-scale coherent structures and their role in the Richardson cascade of turbulence, International Workshop on Nonequilibrium Dynamics in Astrophysics and Material Science, 2011 年 11 月 2 日、京都大学

④ Susumu Goto, Shigeo Kida, Turbulence visualization using reflective flakes, Thirteenth European Turbulence Conference, 2011 年 9 月 13 日, The university of Warsaw

⑤ 後藤晋、藤原昌弘、山登将宏、歳差運動をする回転楕円体容器内に維持される乱流、日本流体力学会年会 2011、2011 年 9 月 7 日、2011 年 9 月 7 日

⑥ Susumu Goto, Masahiro Fujiwara, Masahiro Yamato, Turbulence sustained in a precessing sphere and spheroids, Seventh International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2011 年 7 月 31 日, Ottawa Convention Centre.

⑦ Susumu Goto, Multiscale self-similar coherent structures in developed turbulence, The first UK-Japan bilateral workshop on turbulent flows generated/designed in multiscale/fractal ways: fundamentals and application, 2011 年 3 月 28 日, Imperial College London

⑧ 後藤晋、秩序構造による乱流現象の理解、第 60 回理論応用力学講演会、2011 年 3 月 10 日、東京工業大学

⑨ 後藤晋、清水雅樹、歳差球体内に維持される乱流の直接数値シミュレーション、第 24 回 数値流体力学シンポジウム、2010 年 12 月

22 日、慶応大学

⑩ 後藤晋、木田重雄、フレークによる流れの可視化の機構、鳥取非線形研究会 2010、2010 年 12 月 17 日、鳥取大学

⑪ 後藤晋、木田重雄、藤原昇平、鱗片状粒子による流れの可視化、第 6 回 日本流体力学会 中四国九州支部 講演会、2010 年 12 月 5 日、福岡大学

⑫ 藤原昌弘、山登将宏、後藤晋、歳差運動をする回転楕円体容器内の流れ、第 6 回 日本流体力学会 中四国九州支部 講演会、2010 年 12 月 4 日、福岡大学

⑬ 後藤晋、乱流輸送現象の大規模数値シミュレーション、第 4 回 シミュレーション科学シンポジウム、2010 年 9 月 14 日、自然科学研究機構 核融合科学研究所

⑭ 後藤晋、木田重雄、藤原昇平、フレークによる流れの可視化、日本流体力学会年会 2010、2010 年 9 月 10 日、北海道大学

⑮ 後藤晋、歳差運動をする容器内に維持される乱流、西日本乱流研究会第 27 回シンポジウム、2010 年 8 月 27 日、広島工業大学

⑯ Susumu Goto, Turbulent energy cascade as a role of coherent vortical structures, 6th IMS Turbulence Workshop on Qualitative Universality, Large- and Small-Scale Coherent Structures and Long-Range Memory in Turbulent Flows, 2010 年 7 月 14 日, Imperial College London

⑰ 後藤晋、乱流中の秩序構造：動力学と統計、京都大学数理解析研究所共同研究集会「乱流の動力学的記述と統計力学的記述の相補性」、2010 年 1 月 14 日、京都大学

⑱ 津田慎也、後藤晋、歳差運動する球体内に維持される乱流の統計、九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」、2009 年 11 月 12 日、九州大学

⑲ Susumu Goto, Turbulent energy cascade caused by vortex stretching, The Twelfth European Turbulence Conference, 2009 年 9 月 7 日, Philipps-Universität Marburg

⑳ 後藤晋、津田慎也、歳差運動する球体容器内の乱流、日本流体力学会 年会 2009、2009 年 9 月 2 日、東洋大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤晋 (GOTO SUSUMU)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号：40321616