

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360071

研究課題名(和文) 歳差運動に駆動される非ニュートン流体の乱流の統計と動力学の解明

研究課題名(英文) Statistics and dynamics of precession-driven turbulence of non-Newtonian fluids

研究代表者

後藤 晋 (Goto, Susumu)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：40321616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：容器の歳差運動を用いた乱流の新しい実験系を構築した。この系は良好な流れの再現性を示すと同時に、同一条件下での数値シミュレーションが可能であるという利点をもつ。室内実験(粒子画像流速測定、レーザードップラー流速測定)と直接数値シミュレーションを相補的に遂行することで歳差(球体/回転楕円体)容器内のニュートン流体の乱流の統計や動力学を明らかにしたのち、微量の界面活性剤(塩化セチルトリメチルアンモニウム)の添加がこの乱流に与える影響を明らかにした。我々の実験条件では、乱流変調は容器中央付近でのみ発現し、壁面近傍の渦構造は影響を受けなかった。この結果はこの水溶液のレオロジー特性と整合的である。

研究成果の概要(英文)：We have constructed a new experimental platform for turbulence research by using the precession of a container. This system has good flow reproducibility as well as the advantage that numerical simulations can be easily conducted under the exactly same conditions as in the laboratory. We performed laboratory experiments (PIV/LDV) and direct numerical simulations to reveal the detailed statistics and dynamics of turbulence of a Newtonian fluid confined in spherical and spheroidal cavities. Then, we investigated the modulation of these turbulence due to the addition of a small amount of surfactant (CTAC). Under our experimental conditions, the turbulence modulation occurs only in a central region of the container, and coherent vortices near the container wall are hardly affected by the surfactant additives. These observations are shown to be consistent with the rheological properties of the surfactant solution.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流 歳差運動 非ニュートン流体 界面活性剤 粒子画像流速測定 レーザードップラー流速測定  
直接数値シミュレーション 回転流体

### 1. 研究開始当初の背景

流体に微量の界面活性剤や高分子を添加すると、流れの様子が劇的に変化する現象が古くから知られる。とくに、これらの物質の添加が乱流を強く抑制する現象は、抵抗低減法のひとつとして工学的に注目され、すでに応用事例もある。

ところが、界面活性剤や高分子などの添加により流体に非ニュートン粘性や弾性の効果が表れ、それらが流れの変調に寄与することは定性的には理解されているものの、その物理機構の詳細は不明のままであった。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、流体の非ニュートン粘性や弾性の影響が、その乱流の統計や動力学に与える影響を定量的に明らかにし、さらに、この乱流変調現象の物理機構を明確にすることを主たる目的とした。

ところで、乱流現象の解明に関する最近の進展は、大規模数値シミュレーションによるところが大きい。とくに、ニュートン流体の流れに対しては室内実験で実現されるのと同程度のレイノルズ数の乱流を数値的にシミュレートすることがすでに可能である。したがって、本研究でも室内実験と数値シミュレーションとを相補的に用いることにより上記の目的を達成する。ただし、非ニュートン流体に対する数値シミュレーション手法はこれまでに数多く提案されているものの、完璧な手法は未だにない。そこで、その開発という付加的な目的も置いた。

### 3. 研究の方法

界面活性剤や高分子の添加による乱流変調現象は、おもに抵抗低減の文脈で注目されてきた。したがって、円管内乱流、境界層乱流、あるいは、平行平板間乱流といった、開いた境界条件下における乱流に対して盛んに研究されてきた。一方で、これらの非ニュートン流体は、その物性が温度や履歴などに強く依存すること、あるいは、(とくに高分子水溶液では)ポンプなどの影響を強く受けることなどが知られ、その取扱いには十分な注意が必要である。現象の解明には実験条件を精度よく制御し、再現性のよい実験を行うことが必要であるが、従来までの多くの研究では開いた境界条件下での実験が多く行われたために、これらの実験条件の制御が必ずしも容易ではなかった。さらに、これらの乱流の維持機構や遷移過程は、ニュートン流体に対してさえも未解決の問題が多く、問題をより複雑にしている。

そこで、本研究では、外的な条件の影響を受けにくい閉じた系を用いた実験系を構築した。具体的には、自転軸が歳差運動をする回転容器内に流体を充填すると、容易に乱流

が維持されるという現象に注目し、この閉じた容器内に維持される乱流の実験を通じて、作動流体の非ニュートン性による乱流の変調機構の解明に挑戦した。ここで、歳差運動とは、コマの首振り運動に代表される『回転する物体の自転軸自身の回転運動』のことである。図1に球体の歳差運動を示す。この図に示す例では、球体の自転軸は、それとは垂直な軸(歳差軸とよぶ)のまわりを歳差運動する。我々はこのような運動をする容器内に流体を充填して、その流れを粒子画像流速測定(PIV)およびレーザードップラー流速測定(LDV)により計測することにより、歳差容器内乱流の変調の時空間特性を明らかにする。

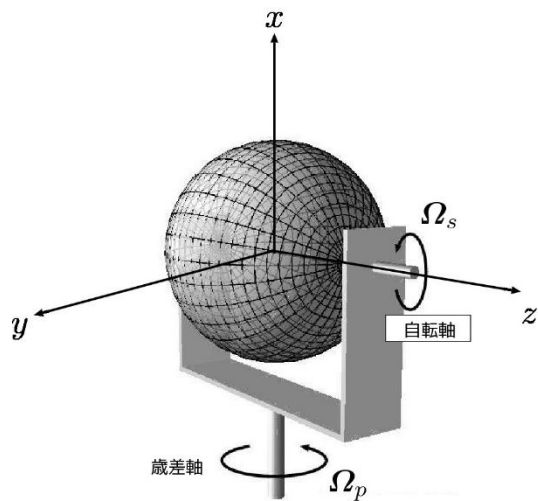


図1 歳差運動をする球体

ところで、容器の形状を球体とした場合(図1)容器内に充填された動粘性係数が $\nu$ のニュートン流体の流れを支配するパラメータは、自転の強さを表すレイノルズ数  $Re = a^2 \Omega_s / \nu$ 、および、歳差の強さを表すポアンカレ数  $Po = \Omega_p / \Omega_s$  の2つとなる。ただし、球体の半径を $a$ 、自転角速度の大きさを $\Omega_s$ 、歳差角速度の大きさを $\Omega_p$ と表した。なお、本研究の室内実験では半径が90 mmの球体を用いた。

この系の特長のひとつは、これらの2つの支配パラメータさえ精度よく設定すれば、再現性のよい実験を行える点である。とくに、系が閉じているために、流入条件等に留意する必要がない。容器の大きさを固定すると、これらの支配パラメータは2つの回転角速度のおおきさ( $\Omega_s, \Omega_p$ )と流体の動粘性係数 $\nu$ のみに依存する。そこで、前者は回転数を精度よく制御できるモーターを用いて設定した。一方で、後者の精度よく設定のために、装置全体を断熱材で覆った上でその内部の温度を局所温度調節器で制御した。なお、界面活性剤水溶液[塩化セチルトリメチルアンモニウム(CTAC)の希薄水溶液を用いた]の物性値は温度に敏感に依存するので、実験中の作動流

体の温度制御は不可避である。モーターや計測機器の発熱がある環境下であっても、(数時間におよぶ)実験中の作動流体の温度変動が 0.1 以内であることを確認しながら実験を行った。

さらに、境界条件が単純であるために室内実験と厳密に同一の条件で数値シミュレーションが行えるという特長を活かし、数値シミュレーションを上述の室内実験と並行して実行した。この数値シミュレーションでは、球面調和関数とゼルニケ球多項式を展開関数とするスペクトル法による高精度のスキームを用いた。

#### 4. 研究成果

##### (1) ニュートン流体の乱流の統計と動力学

作動流体の非ニュートン性の影響を精査するためには、まず、歳差容器内に維持されるニュートン流体の乱流の性質をよく理解する必要がある。これを明らかにするために、系統的な室内実験と数値シミュレーションを遂行した。図2に示すように、室内実験で計測された赤道面における乱流の時間平均流速場と、数値シミュレーションによる同一パラメタにおける結果は極めてよく一致していることが確認できる。

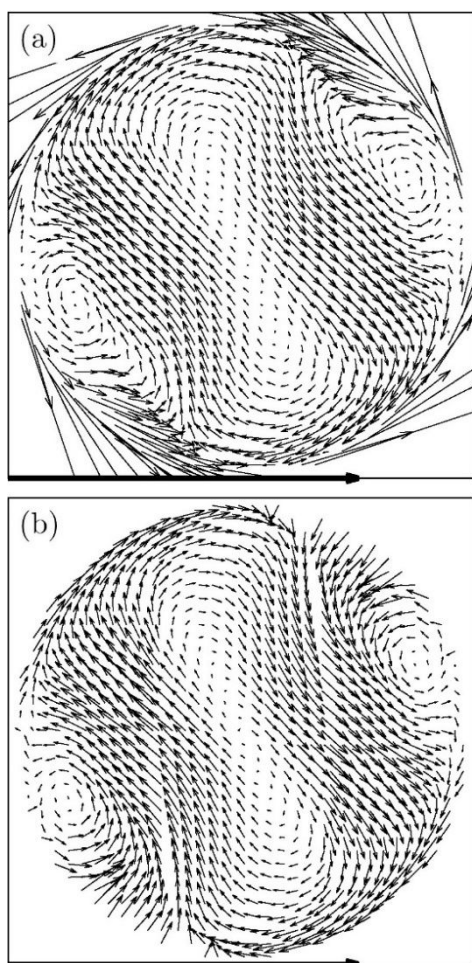


図2 赤道面における平均流速場 ( $Re = 2 \times 10^4$ ,  $Po = 0.1$ ) (a) 数値シミュレーション。(b) 室内実験(PIV)

そこで、これらの実験と数値シミュレーションを相補的に遂行することで、ニュートン流体の乱流に関して、以下のことを明らかにした。

まず、容器が球形の場合、 $Re$ を固定したとき、 $Po$ が0.1程度の場合に最も発達した乱流が維持される。 $Po$ がこれよりも小さい場合には、自転軸まわりの旋回流が支配的となり強い乱流は維持されない。一方、 $Po$ がこれよりも大きい場合には、歳差軸まわりに乱流強度が極端に弱い領域が現れる。また、 $Po$ を固定したまま $Re$ を変化させても、壁面流速で規格化した平均流速場はほとんど変化しないことが明らかとなった。これは、 $Po$ を固定することで、実験室系からみた容器壁面の運動が固定されるため(その時間スケールは $Re$ による)であると考えられる(詳細は室内実験に関しては公表論文、数値シミュレーションに関しては公表論文をそれぞれ参照)。

次に、容器の形状が維持される乱流に与える影響を室内実験により明らかにした。具体的には、球体容器と、回転楕円体(長球、短軸半径と長軸半径の比は0.9)容器を用いた室内実験を遂行し、乱流が維持される条件と維持される乱流の統計性質を調べた。興味深いことに、容器内に乱流を維持するためには、回転楕円体容器の方が球体容器よりもより強い歳差を必要とすることが明らかとなった。これは回転楕円体容器の壁面からの圧力が、低い $Po$ で維持される定常旋回流をより安定化するためであると考えられる(詳細は公表論文を参照)。

さらに、数値シミュレーションによれば、 $Po$ が0.1程度の場合に維持される非常に乱れた流れの3次元構造の詳細を明らかにすることができた。つまり、この乱流中には一対の大規模構造が存在し、それが壁面近傍の小規模な渦構造を容器内部に放出するとともに、その周囲の強い剪断により乱れを強化する。これが、歳差容器内の乱流の維持機構の骨幹をなすと考えられる(詳細は公表論文を参照)。

##### (2) 界面活性剤の添加による乱流変調

次に、微量(数十ppm程度)の界面活性剤(CTAC)を添加した場合の乱流の変調を室内実験により明らかにした。

まず、対イオンの濃度の影響について調べた。対イオンの添加により、この陽イオン性界面活性剤は溶媒中で紐状のミセル構造を形成することが知られる。この紐状のミセル構造が乱流変調において本質的であることを確認するために、対イオン濃度を変化させて実験を行った結果、対イオンと界面活性剤のモル比が0.5よりも小さい場合には顕著な乱流変調は見られず、一方、モル比を1以上

としても変調の様子はほとんど変化しないことが確かめられた。

次に、CTAC の濃度を 50 ppm、対イオン濃度を 50 ppm (したがって、モル比が 1:2) に固定して、流れのパラメタ ( $Re, Po$ ) を系統的に変化させて実験を行い、この活性剤の添加が乱流に与える影響を調べた。結果の一例を下に示す。なお、界面活性剤水溶液のレイノルズ数は、同温度の水の動粘性係数を用いて評価した。

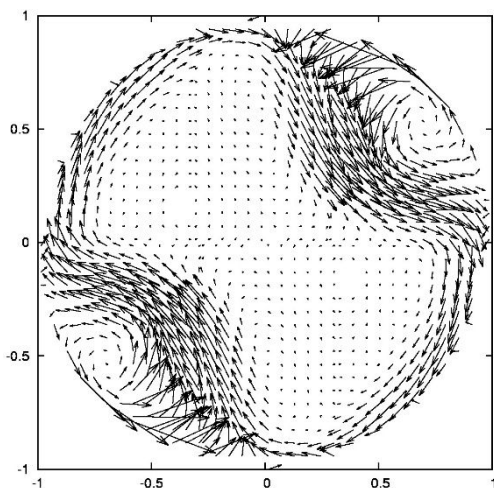


図3 界面活性剤 (CTAC, 50 ppm) 水溶液の乱流の赤道面における平均流速場 ( $Re = 2 \times 10^4, Po = 0.1$ )。図2と比較すると乱流変調の様子が理解できる。

上は、この容器内にもっとも強い乱流が維持されるポアンカレ数 ( $Po = 0.1$ ) における結果である。この図と図2とを比較すると分かるように、球体容器の中心付近の乱流は界面活性剤の添加の影響を強く受けている一方で、壁面近傍の流れはほとんど影響を受けない。とくに、微量の活性剤の添加にも拘らず、容器の中心付近の乱流は劇的に低減されることは注目に値する。ただし、壁面近傍の特徴的な渦構造は界面活性剤の添加の影響をほとんどうけない。この傾向は、半径が 90 mm の球体容器を用いて行った  $Re$  が数千から数万程度の我々の実験では共通に見られた傾向である。(1) で述べた歳差容器内の乱流の維持機構を思い出す。検討したパラメタ域では、壁面近傍の剪断は十分に強いために界面活性剤水溶液の非ニュートン性は壁面近傍では顕著ではない。したがって、壁面近傍の大規模構造の維持機構は影響を受けない。一方で、境界層から放出された小規模渦の伸長過程に対しては、界面活性剤の非ニュートン性が影響し、その効果を低減するために、容器中心部の乱流は強く変調されると考えることができる。実際、数値シミュレーションを用いて、剪断速度の空間分布を調べたところ、上述の描像と整合的であることが確かめられた。

次に、界面活性剤の添加が歳差運動をする球体容器中の乱流の遷移過程に与える影響

を、LDV を用いて調べた。とくに、弱い歳差域において、 $Re$  を固定したまま、非定常流が維持される最低の  $Po$  を評価した。その結果、我々が実験を行った  $Re$  の範囲では、臨界  $Po$  には、界面活性剤の影響は表れないことが明らかとなった。上述の実験結果とこの結果を合わせて考えると、低  $Po$  域での不安定性が壁面近傍の構造の不安定性に起因するものと考えられる。

なお、非ニュートン流体の乱流のシミュレーション手法の開発は期間内には完遂することができなかったが、今後も継続してこれを行い、室内実験で明らかになった歳差容器内の乱流の変調現象に対する上述の物理機構が正しいことをさらに検証する計画である。

## 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計6件)

Susumu Goto, Yasufumi Horimoto, Genta Kawahara, Experiments on turbulence modulation by surfactant additives in a precessing sphere, Proc. the Ninth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena.

Susumu Goto, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Turbulent mixing in a precessing sphere, Phys. Fluids, Vol. 26, 2014, 115106 (24 pages).

DOI:10.1063/1.4901449

Susumu Goto, Arihiro Matsunaga, Masahiro Fujiwara, Michio Nishioka, Shigeo Kida, Masahiro Yamato, Shinya Tsuda, Turbulence driven by precession in spherical and slightly elongated spheroidal cavities, Phys. Fluids, Vol. 26, 2014, 055107 (30 pages).

DOI: 10.1063/1.4874695

(学会発表)(計24件)

Yasufumi Horimoto, Susumu Goto, Genta Kawahara, The effect of rheological properties on turbulence in a precessing sphere, ASME JSME KSME Joint Fluids Engineering Conference, 2015年7月, ソウル(韓国).

Susumu Goto, Yasufumi Horimoto, Genta Kawahara, Experiments on turbulence modulation by surfactant additives in a precessing sphere, The Ninth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2015年7月2日,メルボルン(オーストラリア).

Susumu Goto, Transition to turbulence in weakly precessing

spherical and spheroidal cavities, France-Japan workshop on transition to turbulence, 2014年11月12日,大阪大学(豊中市).

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定常流の不安定性, 第92期日本機械学会流体工学部門講演会, 2014年10月25日, 富山大学(富山市).

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, 2014年10月16日, 福井市交流プラザ(福井市).

堀本康文, 山登将宏, 後藤晋, 清水雅樹, 河原源太, 界面活性剤の添加による歳差球体内乱流の変調, 日本機械学会2013年度年次大会, 2013年9月11日, 岡山大学(岡山市).

後藤晋, 歳差運動をする容器内流れの室内実験と直接数値シミュレーション, 日本機械学会北海道支部特別講演会, 2013年12月20日, 北海道大学(札幌市).

清水雅樹, 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シンポジウム, 2013年9月11日, 核融合科学研究所(土岐市).

Susumu Goto, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Turbulent mixing in a precessing sphere, The Eighth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2013年8月29日, ポアチエ(フランス).

小池裕貴, 清水雅樹, 木田重雄, 歳差回転球流における乱流リングの生成維持メカニズム, 京都大学数理解析研究所研究集会, 2013年1月11日, 京都大学(京都市).

山登将宏, 後藤晋, 堀本康文, 河原源太, 歳差運動する球体容器内に維持される界面活性剤水溶液の乱流, 第90期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012年11月17日, 同支社大学(京都市).

Yuki Koike, Masaki Shimizu, Shigeo Kida, Genta Kawahara, Susumu Goto, Continuous spin-up and dynamo in a precessing sphere, JSST 2012, International Conference on Simulation Technology, 2012年9月28日, 神戸大学(神戸市).

後藤晋, 田鍬幸司, 清水雅樹, 歳差運動をする球体内の乱流による混合, 日本流体力学会年会, 2012年9月18日, 高知大学(高知市).

研究者番号: 40321616

(2)研究分担者

河原源太(KAWAHARA, Genta)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号: 50214672

(3)研究分担者

清水雅樹(SHIMIZU, Masaki)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教  
研究者番号: 20550304

(4)連携研究者

中原明生(NAKAHARA, Akio)

日本大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 60297778

6. 研究組織

(1)研究代表者

後藤 晋(GOTO, Susumu)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授