

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760115
 研究課題名（和文）
 二軸回転球体を用いた乱流混合の制御
 研究課題名（英文）
 Control of Turbulent Mixing in a Precessing Sphere
 研究代表者
 後藤 晋 (GOTO SUSUMU)
 京都大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番：40321616

研究成果の概要：自転軸が歳差運動する球体容器内に流体を充填すると、極めて弱い歳差であっても非常に強い乱流を生成維持させることができることを室内実験により明らかにした。とくに自転角速度の大きさに対する歳差角速度の大きさがわずか5%程度の場合にもっとも発達した乱流が得られる。このことから、歳差運動する容器を用いた（攪拌翼を持たない新しいタイプの）混合器の効率は、このような非常に弱い歳差の場合に最適化されると期待できる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,800,000	0	2,800,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	180,000	3,580,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流

1. 研究開始当初の背景

(1) 我々は準備的な室内実験により、自転軸が他の軸（歳差軸とよばれる）のまわりを回転する球体（歳差球体あるいは二軸回転球体とよぶ）内に充填した流体は極めて容易に乱流化できることを見出した。具体的な実験事実は以下の通りである。この歳差球体内の流れは自転角速度の大きさ Ω_H 、球体の半径 a 、流体の動粘性係数 ν で定義されるレイノルズ数 $Re = a^2 \Omega_H / \nu$ 、および自転角速度の大きさ Ω_H と歳差軸まわりの回転角速度（歳差角速度）の大きさ Ω_V の比（歳差強さ） $\Gamma = \Omega_V / \Omega_H$ の2つのパラメータに支配される。

研究開始当初までの室内実験における観察によれば、レイノルズ数 Re がおおよそ1500以上であれば、 $\Gamma = 0.01$ から0.1程度の極めて歳差であっても、強い乱流が得られることが分かっていた。

この事実は『攪拌翼を用いることなしに、滑らかな境界をもつ容器内の流体の強い混合が実現できること』を意味するので、新しいタイプの混合器の開発を期待させる。ところが、この歳差球体内の乱流の維持機構や、乱流が得られる精確なパラメータ領域、あるいは得られる乱流の統計的な特徴などのほとんどは未知のままであった。

(2) 地球の自転軸も非常に弱い歳差運動をしていることが知られる。このため、歳差運動する容器内の流体運動はこれまでおもに地球物理学の立場から研究されてきた。実際、Malkus による先駆的な研究によれば、40年以上も前に歳差容器内の流れが乱流化されることが実験的に示され、これが地磁気の生成メカニズムに影響を与える可能性が示唆されている。しかし、これまでにこの興味深い特徴の工学応用を目指した研究はなかった。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究では歳差運動(二軸回転)を用いた新しいタイプの混合器の開発を目指した。

ところが、乱れた流れが効率のよい混合を生み出すことは直感的には明らかであるにも拘わらず、その物理機構や制御方法のほとんどは未知のままである。したがって、一般に混合器の最適化は思考錯誤に頼らざるを得ない。

一方で、前節で述べたようにこの混合器内の流れを支配するパラメタは、2つの回転角速度に由来する2つ(Re と Γ)のみである。したがって(室内実験において回転角速度の精確な制御は容易であるので)極めて再現性のよい実験が行えるとともに、混合の最適化も系統的に行える可能性がある。また、混合過程を室内実験のみから詳細に議論することは必ずしもやさしくないが、この系は境界条件が単純であるため厳密に同一の条件下での数値シミュレーションが行えるという特長も併せ持つ。

そこで本研究では、歳差運動する球体容器という(駆動機構と境界条件が)単純な系を用いることにより、乱流混合過程という複雑な現象の解明とその制御法の確立に挑戦するとともに、よく制御された混合器の提案を最終目的とした。そして2か年の研究期間内には、歳差球体内の強い乱流の維持機構の解明、強い乱流(したがって強い混合)が得られる最適パラメタを明らかにすることを具体的な目的とした。

3. 研究の方法

研究は室内実験(ここで球体の歳差運動は図1のように、自転している球体を一定角速度で回転するターンテーブル上に載せることで実現した)を主体にして行った。ただし前節で述べたように、室内実験だけから、球体内の流れ構造や分岐構造の詳細、あるいは混合過程を詳細に議論することはできないので、補助的に数値シミュレーションを用いた。

(1) 室内実験(装置の概要を図2に示す)における計測はおもに高速度カメラおよび

本補助金により購入したレーザー光源を用いた粒子画像流速計測法(PIV)による。このとき、速度の計測は図2の実験装置に示すターンテーブル上で行った。ターンテーブルに固定されたこの座標系は特別な系である。これは慣性力も境界条件も時刻に陽には依存しないので、もしも定常流が実現されるとすればこの系で実現されるからである。

ところが、この系における計測を行うには工夫が必要である。なぜならば、PIVに用いる高出力のレーザー光源は大型であるので、これをターンテーブルに載せることは現実的ではないためである。そこで光源は実験室に設置したまま、そのビーム光をターンテーブルの回転軸(鉛直軸)に沿って入射させ、このビーム光をターンテーブル上に固定したロッドレンズによりシート光に変換した。この工夫により、この回転系での流速をPIVにより計測することが可能となった。

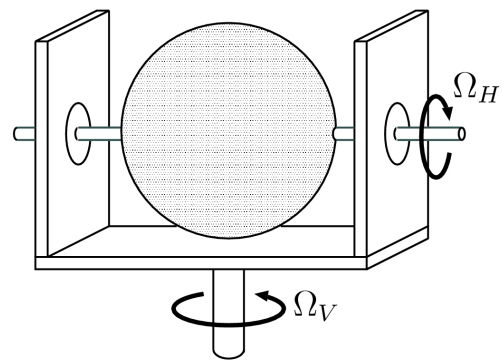


図1 歳差球体(二軸回転球体) 球体を水平軸まわりに一定角速度 Ω_H で回転させ、その全体を鉛直軸まわりに一定角速度 Ω_V で回転させる。

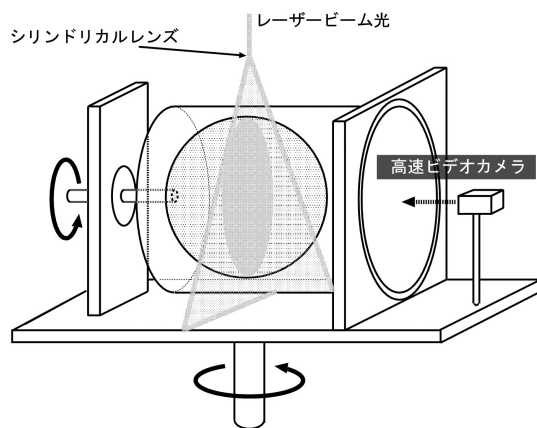


図2 実験装置の概要 鉛直軸に沿って入射してきたレーザービーム光を、ターンテーブルに固定されたロッドレンズでシート光へと変換する(つまり、シート光はターンテーブルとともに回転する)。このシート光によるトレーサー粒子の散乱光を高速度ビデオカメラで撮影してPIV計測を行った。

また、この計測の精度は撮影画像やレーザー光の球体容器による歪みの大きさに依存する。このため、球体容器の外壁は円筒状にし（これにより球体中心部に入射したレーザー光はほとんど歪まない）、さらに図2に示す大きな軸受けを用いることにより円筒底面に観察窓を設けた。これらの工夫によりPIVの計測精度を劇的に向上させることができた。

(2) 一方で数値シミュレーションでは、スペクトル法を採用した。展開関数は動径方向にはヤコビ多項式の一種、角度方向には球面調和関数を用いた。

このスペクトル法によるシミュレーションは高精度であり信頼できるが、スーパーコンピュータを用いても演算速度の制約から乱流域まではシミュレートすることはできなかった。このため、数値シミュレーションは、おもに層流から乱流への遷移過程における流れ構造の室内実験との比較や、分岐構造の詳細な検討に用いた。

4. 研究成果

(1) この系の最大の特徴は極めて弱い歳差でも強い乱流が得られることである。この興味深い特徴の起源を明らかにするため、まずは層流から乱流への遷移過程を室内実験により詳細に調べた。たとえば、レイノルズ数 Re が 2.8×10^4 の場合、 $\Gamma \approx 0.02$ という非常に弱い歳差であっても十分に乱れた流れとなる。この遷移過程を図3に示す。歳差強さが 0.0025 の場合には流れは定常流であるが、興味深いことに図3(a)に見られるような特徴的な秩序構造を有することが分かった。この構造は歳差を強くする ($\Gamma = 0.0053$) と図3(b)に示すように波状の変形を受け、さらに歳差を強くする ($\Gamma = 0.021$) と図3(c)に示すように崩壊して乱流へと遷移する。

この観察結果より、乱流の維持機構を理解するには、層流域に現れたこの秩序構造の維持機構やその不安定性を理解することが鍵となりそうである。

(2) 図3(a)や(b)で見られた遷移域における秩序構造の詳細を明らかにするために、数値シミュレーションを実行した。結果を図4に示す。室内実験では球体の中心を通り、自転軸に垂直な面内の構造しか明らかに出来なかったが、数値シミュレーションにより、その3次元構造全体を明らかにすることができた。図4によれば、流れ場にはバナナ状の構造が存在することが分かる。実際、室内実験で発見された構造(図3)はこのバナナ状の構造の断面に対応することも確認された。

さらに、数値シミュレーションを用いて、この流れにおける混合過程を調べると、内部

流れがこのバナナ状の構造によりいくつかの領域に分割されてしまうため、強い混合は期待できないことが分かった。逆に、この構造が崩壊した流れでは強い混合が維持されると期待される。

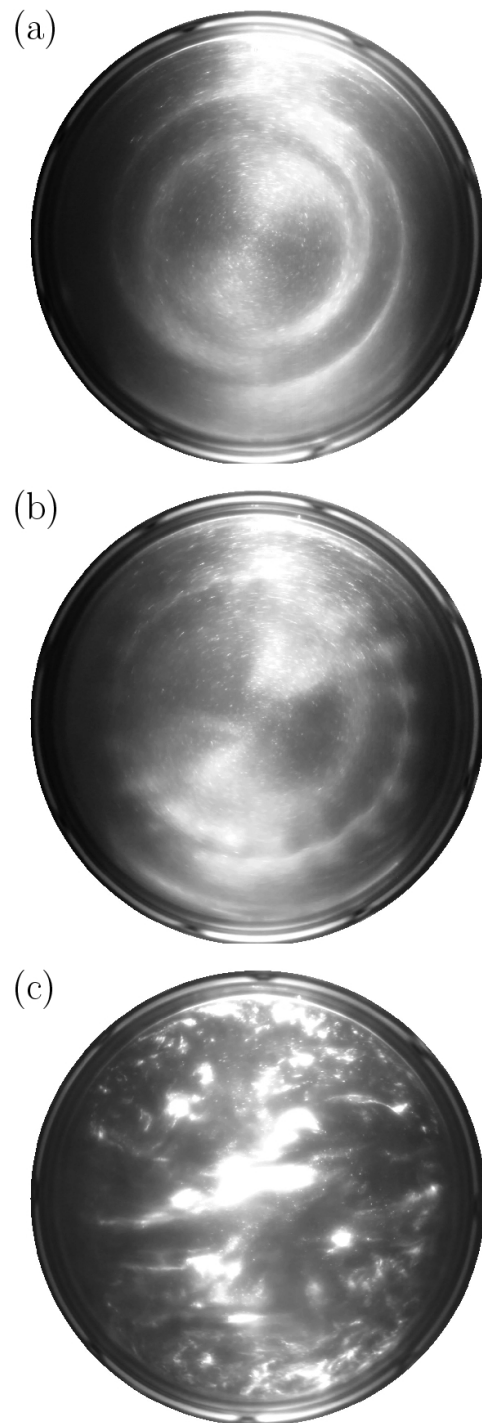


図3 歳差が弱い場合の層流から乱流への遷移過程 レイノルズ数 Re を 2.8×10^4 に固定したまま、歳差強さ Γ を (a) 0.0025 、(b) 0.0053 、(c) 0.021 と変化させた場合の室内実験の可視化結果。(a) の定常流では秩序構造が見られ、(b) の周期流ではその構造が波状の変形を受け、(c) の乱流では崩壊している。

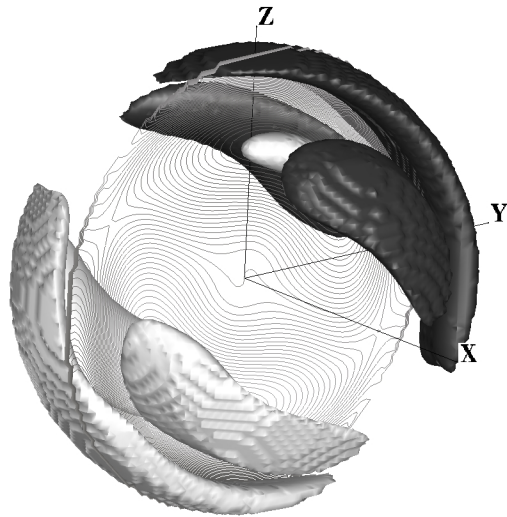


図4 遷移域における秩序構造 数値シミュレーションの結果（ヘリシティの等値面を示し、色は符号に対応する）。X軸が自転軸であり、室内実験の可視化（図3）はX=0平面におけるものに対応する。

(3) 次に、歳差球体内に乱流が維持されるパラメタ域において、流れ場の統計性質を室内実験により詳しく調べた。その結果以下の事実が明らかとなった。(i) 乱流の平均流の構造は歳差強さのみに依存し、レイノルズ数にはほとんど依存しない。(ii) 乱流の強度（球体の中心部で計測したテーラー長レイノルズ数で評価した）は、レイノルズ数を固定した場合には、歳差強さ Γ が0.05程度で最大化する（ただし、これはレイノルズ数が $O(10^4)$ までの実験結果に基づく）。

ここで『歳差強さ Γ を固定してレイノルズ Re 数だけを変化させる』ということは『球体容器の運動の様子を固定したまま、その時間スケールだけを変化させる』ことに対応することに注意すれば、前者の結果は容易に理解できる。一方で、後者の結果の解釈はまだ不明であるが、歳差強さが5%程度の場合に維持される流れの大規模構造が、より小さい構造をより効率よく生み出す性質を有することが示唆される。

またこの結果から、歳差球体内の乱流混合も歳差強さ Γ が4%程度の場合に最適化されるはずである。

以上(1)から(3)の成果により、歳差運動する球体容器を用いた『よく制御された混合器』の開発の土台が完成したことになる。この研究成果は、乱流混合の基礎研究としての側面だけではなく、広範な工学応用の可能性を秘めており、さらなる発展を目指して研究を継続する計画である。

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11件)

- ① S. Goto and J. C. Vassilicos, “The Dissipation Rate Coefficient of Turbulence Is Not Universal and Depends on the Internal Stagnation Point Structure,” *Phys. Fluids*, 21, 035104, 2009. 査読あり
- ② S. Goto, A Physical Mechanism of the Energy Cascade in Homogeneous Isotropic Turbulence, *J. Fluid Mech.*, 605, 355-366, 2008. 査読あり
- ③ S. Goto, Multi-scale Coherent Structures and Their Role in the Energy Cascade in Homogeneous Turbulence, *Proceedings of the Korea-Japan CFD Workshop*, 1, 355-358, 2008. 査読なし
- ④ S. Goto, Physical Mechanism of the Energy Cascade in Homogeneous Isotropic Turbulence, *Proceedings of the International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, CD-ROM, 2008. 査読なし
- ⑤ 後藤晋, 秩序構造による乱流現象の理解, *ながれ*, 27, 195-198, 2008. 査読なし
- ⑥ S. Goto and J.C. Vassilicos, Sweep-stick Mechanism of Heavy Particle Clustering in Fluid Turbulence, *Phys. Rev. Lett.* 100, 54503 (4 pages), 2008.
- ⑦ S. Goto, N. Ishii, S. Kida, and M. Nishioka, “Turbulence Generator Using a Precessing Sphere,” *Phys. Fluids*, 19, 61705 (4 pages), 2007. 査読あり
- ⑧ S. Goto, S. Kida, “Reynolds-number Dependence of Line and Surface Stretching in Turbulence: Folding Effects,” *J. Fluid Mech.*, 586, 59-81, 2007. 査読あり
- ⑨ S. Goto, J.C. Vassilicos, H. Yoshimoto, Turbulent Clustering of Inertial Particles and Acceleration Field, *Advances in Turbulence*, 11, 103-105, 2007. 査読なし
- ⑩ S. Kida, N. Nakayama and S. Goto, Flow Structure in a Bi-Axially Rotating Sphere: a Compact Turbulence Generator, *Advances in Turbulence*, 11, 251-253, 2007. 査読なし
- ⑪ S. Goto, S. Kida, M. Nishioka, N. Ishii, and K. Nakayama, “Well-Controllable Turbulence Generator Using a Biaxially Rotating Sphere,” *Proc. of the Fifth International Symposium on*

Turbulence and Shear Flow Phenomena, 1, 247-252, 2007. 査読なし

[学会発表] (計15件)

- ① 後藤晋、宇野達哉『発達した乱流における秩序渦の階層構造』日本物理学会 第64回年次大会 (2009年3月27日、立教大学)
- ② 後藤晋、松永有仁、木田重雄、西岡通男『弱い歳差運動をする球体内流れにおける秩序渦』、共同研究集会『乱流の多重性・階層性とその数理的構造』(2009年1月14日、京都大学 数理解析研究所)
- ③ 後藤晋、J. C. ヴァシリコス『乱流のエネルギー散逸係数の非普遍性』、共同利用研究集会『乱流現象及び自由度系の動力学、構造と統計法則』(2008年11月15日、九州大学 応用力学研究所)
- ④ S. Goto, "Multi-scale Coherent Structures and Their Role in the Energy Cascade in Homogeneous Isotropic Turbulence," Korea-Japan CFD seminar (2008年10月24日、Sogang University、韓国)
- ⑤ S. Goto, "Multiple-scale Structures in Developed Turbulence," 第2回シミュレーション科学シンポジウム (2008年9月24日、多治見市産業文化センター)
- ⑥ 後藤晋『秩序構造による乱流現象の理解』、日本流体力学会年会 (2008年9月4日、神戸大学)
- ⑦ S. Goto, "Physical Mechanism of the Energy Cascade in Homogeneous Turbulence," The International Congress of Theoretical and Applied Mechanics 2008 (2008年8月28日、Adelaide Convention Centre、オーストラリア)
- ⑧ S. Goto, "A Scenario of the Energy Cascade in Turbulence: The Role of Vortex Stretching," 共同研究集会『オイラー方程式の数理：渦運動150年』 (2008年7月16日、京都大学 数理解析研究所)
- ⑨ 後藤晋、J. C. ヴァシリコス『乱流エネルギー散逸に関するテイラーの関係式』日本物理学会 第63回年次大会 (2008年3月24日、近畿大学)
- ⑩ 後藤晋『乱流中の階層秩序構造が果たす役割』、シミュレーション科学共同研究研究会 (2008年2月6日、核融合科学研究所)
- ⑪ 後藤晋『一様等方乱流における エネルギーカスケードの物理描像』、共同研究集会『乱流研究の展望：ブレイクスルーを求めて』(2008年1月18日、京都大学数理解析研究所)
- ⑫ 後藤晋『一様等方乱流における エネルギーカスケード』共同利用研究集会『乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則』(2007年11月23日、九州大学 応用力学研究所)
- ⑬ 後藤晋、J. C. ヴァシリコス『乱流中の加速度よどみ点と慣性粒子』日本物理学会 第62回年次大会 (2007年9月22日、北海道大学)
- ⑭ S. Goto, S. Kida, M. Nishioka, N. Ishii, K. Nakayama, "Well-Controllable Turbulence Generator Using a Biaxially Rotating Sphere," The fifth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (2007年8月27日、ミュンヘン工科大学、ドイツ)
- ⑮ S. Goto, J.C. Vassilicos and H. Yoshimoto, "Turbulent Clustering of Inertial Particles and Acceleration Field," 11th European Turbulence Conference (2007年6月25日、ポルト大学、ポルトガル)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 晋 (GOTO SUSUMU)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40321616