

令和 5 年 10 月 29 日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04201

研究課題名（和文）Active振動系とPassive振動系の動的抗力係数と流体相互作用

研究課題名（英文）Dynamic drag coefficient and fluid dynamic interaction for active or passive oscillating system

研究代表者

永弘 進一郎（Shin-ichiro, Nagahiro）

仙台高等専門学校・総合工学科・准教授

研究者番号：20419154

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、浮遊水粒子を含む流れの中で回転する球体に対する逆マグナス効果を実験的に検討した。揚力は、回流風洞に水滴を注入した状態において測定した。その結果、マイクロメートルサイズの水滴の存在が逆マグナス効果の発現に大きく影響し、揚力の方向が反転する臨界レイノルズ数とスピン比の減少を引き起こすことがわかった。油滴を用いた対照実験では逆マグナス効果の誘起は観測されず、さらに液滴の電荷測定を行なった結果、水粒子のみが顕著に帯電していた。このことから、液滴の電気的な相互作用が境界層の剥離点周りの流れに重要な役割を果たしている可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空中を浮遊する微小液滴の分布が、流体に及ぼす影響についてはレオロジーや粉体物理と関連して多くの研究がなされてきた。本研究では、帯電した微小液滴が非常に低密度な領域において境界層剥離に大きな影響を与えていることを実験的に示した点において、新たな知見を与えたものと考えている。一方で、スポーツにおいては霧の発生時のボールの軌道変化と関係する身近な問題である。とくにアジアで盛んに行われているソフトテニス競技では霧の発生がボールの軌道を大きく変えることはよく知られており、本研究はこの事実を実験室内で再現し定量的な測定を行なった初めての例となった。

研究成果の概要（英文）：The present study experimentally investigates the inverse Magnus effect on a spinning sphere in a flow containing suspended water particles. The lift force is measured by injecting water droplets into a closed return wind tunnel. Our results indicate that the presence of micrometer-sized water droplets significantly affect the onset of the inverse Magnus effect, causing a decrease in the critical Reynolds number and spin ratio at which the direction of the lift force is reversed. Furthermore, we find that the electric charge of water particles plays an important role for the flow around the separation line.

研究分野：流体力学

キーワード：逆マグナス効果 境界層剥離 微小液滴の密度・電荷測定

1. 研究開始当初の背景

本研究計画は、流れの中で振動する物体をアクティブ振動系とパッシブ振動系に分類した上で、それらが受ける抗力と流体相互作用に着目した。開始の当初は、パッシブな振動系として流れの中ではためき運動を行う糸に着目し、2次元液幕流れにおいて実験を行った。はためき糸の抗力について、当初から予定していた歪みゲージを用いた測定の精度を上げることに予想以上の困難があった。

研究期間を考慮し、アクティブ振動系として回転球を考え、パッシブに浮遊するサスペンションが流れと球の抗力に与える影響を調べた。具体的には、一様流れの中をマイクロメートルサイズの水滴が分散している場合、その密度が極めて低い場合であっても流れの効力に大きな変化が現れることが実験的に示唆され、そのメカニズムと発生条件を調べた。

2. 研究の目的

実験で使用した代表的な液滴の直径はおよそ $5\mu\text{m}$ の水粒子で、回転球サイズの1万分の1以下である。また数密度は大雑把な測定ではおよそ $10\sim 100\text{個}/\text{cm}^3$ である。

液滴の分布による流体の実効的な密度の変化は $10^{-8}\%$ 、粘度の変化は $10^{-6}\%$ でしかなく、通常のサスペンション系のレオロジーの問題としては、ほぼ無視できる大きさである。それにもかかわらず、液滴の分布によってマグナス力の方向が通常と反転する「逆マグナス効果」が液滴の分布によって誘起される現象が発生する。これがどのようなメカニズムで発生し、またその発生条件を定量的に調べることを目的として研究を行った。また、この問題は、PIV 測定の適用範囲の見直しや、正確な流体の可視化を実現するために用いるべき霧の密度や種類の最適化の問題にもつながる。

3. 研究の方法

図1に実験の概略図を示す。回流型の風洞を用い、直径5mmのステンレスシャフトにスチロール

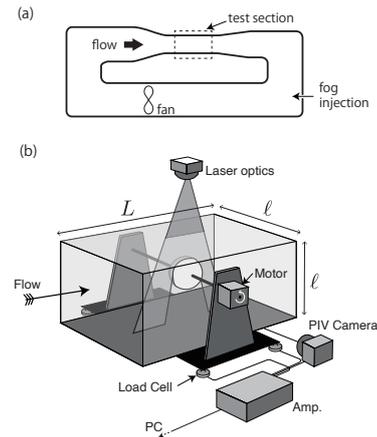


図1 実験の概略図.(a) 回流風洞と霧の注入位置。(b) 回転球の固定部と揚力の測定

球を固定しモータ (Oriental Motor BML230HP-ACS) に繋いで回転を与える。球とモータを固定する台座の全体の重量変化からマグナス力を測定する。重量を測定するロードセル (Kyowa LMB-A-10N) の精度は 0.3N ほどであるが、定常状態において30秒から2分ほどの測定結果を平均化することでモータの振動の影響を除去し、 0.1N 以下の測定精度を実現した。球の直径は $d = 6\text{cm}$ である。球を外した状態で揚力の測定を行い、シャフトの影響は無視できるほどに小さいことを確認した。回転速度は $\omega = 50\sim 3000\text{rpm}$ 、最大風速 $v = 30\text{m/s}$ の範囲である。回転球の振動の振幅は、球の直径の1%未満に抑えられている。以下に示す結果においてレイノルズ数を $\text{Re} = \frac{vd}{\nu}$ 、スピン比を $\Gamma = \frac{d\omega}{2v}$ と定義する (ν は空気の動粘性係数)。

サスペンションとして「霧のイケウチ」製のスプレーノズルを用いて発生させた液滴、市販のスモークマシーンから生成したポリエチレングリコール (PG) 液滴と、ラスキンノズルから生成した DOS オイルの液滴を用いる。

3.1 サスペンションの測定

用いる微粒子の測定手法について詳述する。

3.1.1 平均粒径の分布

シリコンオイルを塗布したスライドガラスに、スプレーノズルから噴霧した水滴と、スモークマシンから放出した PG 液滴を容易にトラップすることができる。それを顕微鏡下で撮影し、画像のピクセル値から粒径の分布を求めたその結果を 2 に示した。スプレーノズルからの水滴の平均粒径は $12\mu\text{m}$ ほど、スモークマシンからの PG 粒子の平均粒径は $28\mu\text{m}$ ほどであった。ラスキンノズルからの DOS 粒子の粒径は、この方法では小さ過ぎて測定ができなかったが、粒径は $1\mu\text{m}$ ほどの分散の小さい粒子であることが報告されているので、その値を用いた*1。

3.1.2 電荷の分布

液滴の帯電が境界層に及ぼす影響を評価するために、液滴の電荷分布の手法を開発し測定を行った。その測定の概略を図 3(a) に示す。およそ 10cm 四方のアルミ板で平行平板を構成し、アクリルの箱に収めた状態で、ファンクションジェネレータからの信号をアンプで増幅し、平行平板に 150Hz、peak to peak で 560V の電圧を印加する。アクリルの箱に測定する液滴を導入し、入射させたレーザーの散乱光を顕微鏡下で撮影した。撮影結果を図 3(b-d) に示す。スプレーノズルからの液滴がサインカーブ形状で屈曲した軌跡を描いているのに対して、DOS と PG 粒子の場合はほぼ直線である。また屈曲の形状からスプレーノズルからの液滴の帯電は正負がほぼ等量であった。

液滴は空気からストークス抵抗を受けていると仮定すれば、撮影から得られた振幅より帯電量を容易に算出できる。その結果液滴は平均で 10^{-15}C ほどで正負に帯電していることを見出した。一方で DOS と PG 粒子の帯電は検出されなかった。図 3(c,d) では粒子の軌跡がわずかに揺らいでいるのが認められるが、サインカーブ形状ではないことから、これはブラウン運動が見えているものであり、帯電によるクーロン力の反映ではないと判

*1 W.C. HINDS and J.M. MACHER and M.W. FIRST, American Industrial Hygiene Association Journal, 44, 7, 495(1983)

断した。

3.1.3 測定部での空間密度

粒子密度の測定は、PIV 装置のパルスレーザーを用いて $10\mu\text{s}$ 程度の時間間隔でシートレーザーを照射し、マクロレンズで粒子を直接撮影してカウントすることが可能であるが、実験では 1 秒オーダーの時間分解能で密度を知る必要があり、この方法は全く現実的ではない。そこで、密度の測定についても、風洞測定部にレーザーを入射しその散乱光の強度を測定することで行った。パルスレーザーを用いて撮影した粒子画像の直接カウ

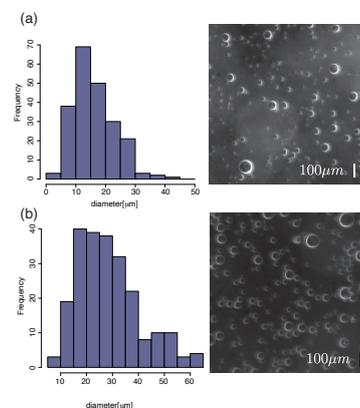


図 2 用いた液滴の顕微鏡写真とサイズ分布。(a) スプレーノズルからの水滴。(b) スモークマシンからの PG 液滴。

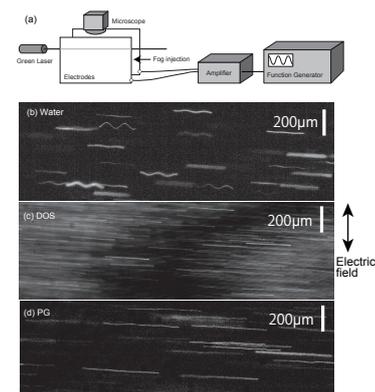


図 3 用いた液滴の振動電場における軌跡。(a) 電荷測定のための実験概要図 (a) スプレーノズルからの水滴。(b) ラスキンノズルからの DOS 液滴。(c) スモークマシンからの PG 液滴。

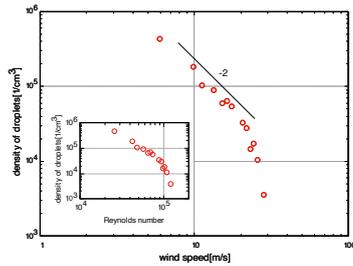


図4 霧の液滴の密度と風速の関係

ントで得られた密度を用いて、散乱強度と密度の間の関係を調べておき、随時キャリブレーションを行って、測定中にリアルタイムで粒子密度を測定した。

図4は、スプレーノズルから霧を一定量で注入した場合の風洞内での液滴の定常密度を、風速の関数としてプロットしたものである。残念ながら、本実験において霧の密度はコントロールできず風速によって変化する。注入した液滴は回転するファンとの衝突するために、単位時間あたりにファンを通過する回数とファンの回転数に比例して失われる。そのため図4の結果のように密度は風速の2乗に比例して減少する結果となった。

4. 研究成果

4.1 霧の効果

図5は、マグナス力と注入した液滴密度の同時プロットである。Re = 1.05×10^5 , $\Gamma = 0.15$ での定常状態のマグナス力を150秒にわたって測定し、 $t = 30, 90$ から液滴を一定時間風洞内に注入している。注入の時間帯はグラフにグレーの背景で示している。(a)水の液滴を注入した場合はマグナス力の反転が明確に現れているのがわかるが、(b)DOS液滴と(c)PG液滴の注入時では、マグナス力は全く影響を受けないことがわかった。

図6は、(a)から(h)にわたってレイノルズ数を 9.92×10^4 から 1.27×10^5 まで増加させ、水の液滴を入れた場合と入れない場合について、スピン比 Γ とマグナス力の関係をプロットしたものである。(a)Re = 9.92×10^4 では液滴のある

なしに関わらずマグナス力はほぼ同じであるが、(b)Re = 1.03×10^5 から(e)Re = 1.18×10^5 にかけてレイノルズ数が大きくなると、両者に顕著な差が現れ、負のマグナス力が明確に安定化している。(g)Re = 1.22×10^5 から(g)Re = 1.27×10^5 くらいまでレイノルズ数が大きい場合、液滴がない場合でも負のマグナス効果は安定して発生し、両者の差はほぼなくなる。

4.2 霧によって負のマグナス効果が安定化する理由

空気中に液滴が分布していることによって、負のマグナス効果の閾値が減少する原因について、我々がおこなった比較実験の結果から、液滴の帯電による長距離力が寄与している可能性が示された。2022年に中国のグループによって報告されたシミュレーション研究によると^{*2}、サスペンションが分散する円管内ながれについて、粒子と壁の衝突による帯電を考慮すると、壁面の粘性底層とバッファ層において流れ方向の運動量が数割ほど増加することが示された。

負のマグナス効果は、ボールの上下面における実効的なレイノルズ数の違いにより、境界層の乱流転移が上下非対称に起こるために生じることはすでに実験的にも理論的な研究から、考えられている。以上の点を総合すると、液滴の帯電によるクーロン力の長距離相互作用によって、より効率的に主流の運動量が壁面付近に輸送され、それによって境界層の乱流遷移が生じることから負のマグナス効果の閾値が減少する、というのが現時点の我々の考察である。

今後は、実験によって液滴の帯電量や風洞内の密度をコントロールすることを実現し、液滴の帯電量と密度について、逆マグナス効果を誘起する閾値を明らかにすることで、より詳細なシミュレーションとの比較を行う必要がある。

^{*2} Yanlin Zhao, Min Liu, Jinzhui Li, Yudong Yan and Jun Yao, Physics of Fluids, 1, 34, 123315(2022)

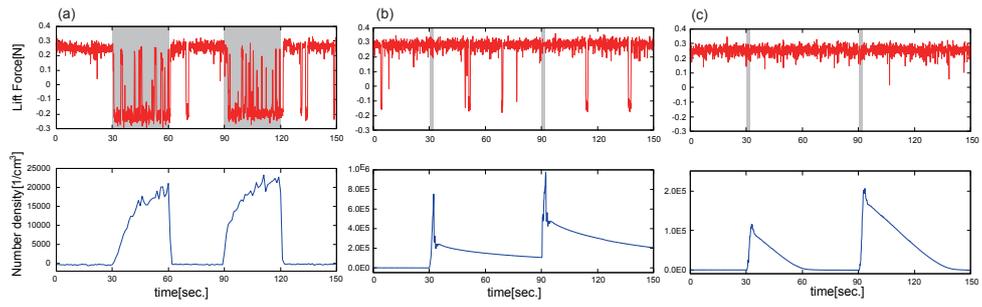


図5 マグナスカと、液滴の分布密度の同時プロット (a) 霧のイケウチ製スプレーノズルからの水滴。(b) ラスキンのノズルからの DOS 液滴。(c) スモークマシーンからの PG 液滴。

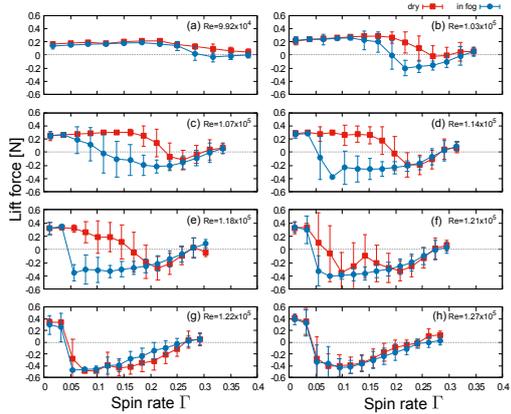


図6 各レイノルズ数における、水の霧の有無とマグナスカとスピン比の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Vladislav Egorov, Olga Maksimova, Irina Andreeva, Hiroshi Koibuchi, Satoshi Hongo, Shinichiro Nagahiro, Hisatoshi Ikai, Madoka Nakayama, Shuta Noro, Tetsuya Uchimoto, and Jean-Paul Rieu	4. 巻 32
2. 論文標題 Stochastic fluid dynamics simulations of the velocity distribution in protoplasmic streaming	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 121902,1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shin-ichiro Nagahiro & Yoshinori Hayakawa	4. 巻 2302.1126
2. 論文標題 Inverse Magnus Effect Induced by Dilute Water Fog	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 (Preprint) arViv	6. 最初と最後の頁 1,6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐々木 凜, 永弘 進一郎, 野呂 秀太
2. 発表標題 ダイラタント流体のずり粘稠化の可視化
3. 学会等名 東北学生会 第 52 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 奥崎 颯大, 永弘 進一郎
2. 発表標題 微小な液滴の電荷の測定
3. 学会等名 東北学生会 第 52 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Tomoaki Endo, Daisuke Nagao, Fumiyo Nagao, Yasuaki Yamaoka, Eunsang Kwon, Shin-ichiro Nagahiro
2. 発表標題 "Synthesis and Evaluation of water-soluble Fullerene produced with Three-dimensional Ball mill"
3. 学会等名 DPacificchem 2021 Congress (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 永弘進一郎
2. 発表標題 霧中におけるマグナス効果の反転現象
3. 学会等名 中西秀先生退職記念シンポジウム(Gather Townにてオンライン開催)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 永弘進一郎, 平塚草吉
2. 発表標題 霧中における負のマグナス効果
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会(東京工業大学)
4. 発表年 2022年～2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	早川 美徳	東北大学・データ駆動科学・AI教育研究センター・教授	
	(Hayakawa Yoshinori)		
	(20218556)	(11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------