

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18818

研究課題名（和文）磁力支持天秤装置による高マッハ数・低レイノルズ数の球周り流れの抵抗と流れ場計測

研究課題名（英文）Drag force and flow field measurement of a sphere in the low Reynolds number and high Mach number flows using magnetic suspension and balance system

研究代表者

野々村 拓（Nonomura, Taku）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60547967

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では低レイノルズ数・高マッハ数条件の球周り流れの非接触での可視化実験を可能にする磁力支持装置の製作を行い、単体球周りおよび複数球周りの流れ場・抵抗係数の解明を行った。磁力で壁付近に支持した球を気流の発生に合わせて放球する実験装置を製作した。本装置により球周りの流れ場・抵抗係数の計測に成功した。単体の球周り流れについて時間の経過とともに生ずる渦構造などの詳細な流れ場の特徴を明らかにした。また得られた抵抗係数は過去のモデルよりも高い抵抗係数となることを確認した。複数球の場合については流れ場・空気力の解明を行い、本研究で調べた範囲では球同士が離れる方向に空気力が作用することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低レイノルズ数・高マッハ数条件の球周り流れは、ロケット打ち上げ時の噴流の中に含まれるアルミナ粒子、噴流からの音響波低減のために撒かれる水滴、高速での固体粒子燃焼などに見られる。このような条件での高速固気混相乱流に関して、粒子がどのように振る舞うかということはこれまで全く明らかではなかったため、このような条件において実験観察を行うことで、その特徴を明らかにしたことは学術的に非常に価値が高い。また、本研究成果に基づきロケット打ち上げ時や高速燃焼時などの乱流場の解明・モデル化を行うことで、今後の輸送機器・燃焼機器の高性能化につながると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, a magnetic support device which enables noncontact visualization experiments of flow around (a) sphere(s) under low Reynolds number and high Mach number conditions was constructed, and the flow field and the drag coefficient around a single and multiple sphere(s) were clarified. An experimental device which releases a sphere supported by a magnetic force near the wall when the flow is generated was constructed. The flow fields around the sphere and the drag coefficients were clarified with this device. Detailed characteristics of the flow field such as the vortex structure generated around a single sphere were clarified. The obtained drag coefficient was higher than those of the previous models. In addition, the flow field and aerodynamic force of multiple spheres were clarified, and the aerodynamic forces were clarified to act in the direction in which the spheres separate in the range we investigated in this research.

研究分野：航空宇宙流体力学

キーワード：流体力学 低レイノルズ数 超音速 遷音速 高マッハ数 固気混相流 磁力支持

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

圧縮性混相流解析や圧縮性領域での粒子が含まれる流れ場は、固体ロケットエンジンの排気、固体粒子による燃焼場での流体と固体粒子の相互作用、圧縮性領域での粒子画像測定法（PIV）での粒子の応答遅れの補正など、近年になって計測や解析が可能となった高速流分野で非常に重要な物理現象を含む。このような流れ場はモデル化や解析を行う際に、粒子を球であると仮定して粒子に働く流体力を算出する必要がある。非圧縮領域である低マッハ数流れでは、ミリカンの油滴実験などの様々な先行研究で球の抵抗のモデル化が行われており、ストークス則やその高レイノルズ数への拡張でおおよそうまく説明ができる。しかしながら、流速が周囲の音速に近づく高マッハ数条件になると抵抗係数は大きく変化し、この領域を包含するより一般的な抵抗係数モデルが必要となる。従来の高マッハ数の抵抗係数モデルは実験データがない領域では経験的な外挿を用いておりその信頼性が十分でない。実際これまでに本研究分担者が衝撃波前後の急激に速度が変わる領域で、PIVで粒子の速度、分子タギング速度計測法（MTV）で流体の速度を調べてその差から抵抗係数を図2に示す条件で間接的に算出したが過去の抵抗モデルでは全く説明できない結果を得ている。この領域で信頼たる抵抗モデルを再構築するためには数値解析で用いる物理モデルを検証するための抵抗係数や流れ場の情報を実験で「直接的に」計測し、数値解析の検証データを得るとともに流れ場の理解を深めることが必須であった。

2. 研究の目的

圧縮性固気混相流解析や圧縮性領域での粒子画像速度計測法（PIV）の高精度化のために重要な高マッハ数・低レイノルズ数の球周り流れの抵抗係数を世界に先駆けた直接的な計測により明らかにし、合わせてその流れ場の構造を明らかにすることを目的とする。具体的には本研究では研究項目を以下のように分け順に研究を行った。

- 1) 非接触での可視化実験を可能にする磁力支持放球装置による衝撃波風洞試験の実現
- 2) 単体球周りの流れ場・抵抗係数の解明
- 3) 複数球周りの流れ場・空気力の解明

3. 研究の方法

流体科学研究所の衝撃波管（衝撃風洞）の利用を前提として

- 1) 非接触での可視化実験を可能にする磁力支持装置の検討・製作を行った上で、本研究の対象である
 - 2) 単体球周りの流れ場・抵抗係数の解明
 - 3) 複数球周りの流れ場・空気力の解明
- を光学可視化法であるシュリーレン法を用いて行った。当初磁力支持天秤機能の利用も考えたが、球の軌跡を追うことで十分に空気力が計測できると判断したため、光学可視化による計測のみで研究を行った。

4. 研究成果

- 1) 非接触での可視化実験を可能にする磁力支持放球装置による衝撃波風洞試験の実現
- 低レイノルズ数かつ高マッハ数の球周り流れを支持装置なしで再現し、その流れ場および抵抗係数を解明するために、まずは風洞試験の可能性を探った。従来法に基づく磁力支持天秤の可能性を探ったが、磁力支持するためには球を磁化するため非常に大きな電流が必要になり、コイルの熱による雰囲気ゆらぎのために可視化ができないことおよび推算した抵抗値の誤差が非常に大きいことが明らかになった。そこで、磁力で壁付近に支持した球を気流の発生に合わせて放球する形式を選択し、この実験装置を製作することから開始した。

丁寧に、衝撃風洞の始動にかかる時間を調べ、それに合わせて放球し、光学可視化を行うことで、流れ場および球の軌跡から抵抗を明らかにできる装置を製作した。図1に概要を示す。この装置を用いることで後述のように球周りの流れ場・抵抗係数の計測に成功した。

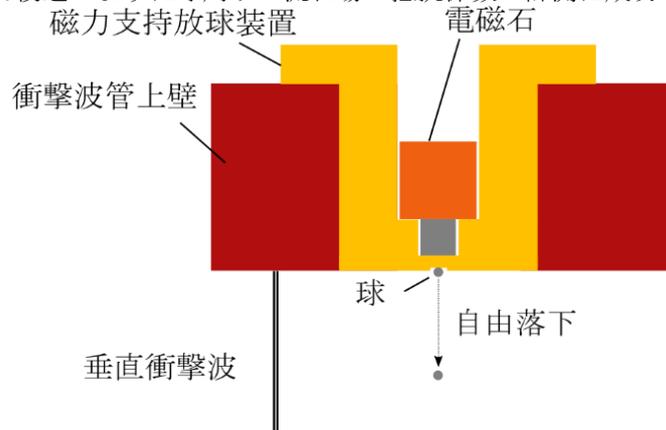


図1. 磁力支持放球装置の概要

2) 単体球周りの流れ場・抵抗係数の解明

1)で製作した磁力支持放球装置を衝撃波風洞試験と合わせて使用し、球周りの流れ場・抵抗係数の計測を行った。ここでは単体球の流れ場・抵抗係数に関する研究成果を示す。

図 2 に衝撃波 Mach 数 $M_s = 1.42$ のケースの瞬時場のシュリーレン画像を示す。時刻 t は球と垂直衝撃波が干渉する時刻を $t=0$ とする。球の直径は 1.5 mm で衝撃波通過後の球と流体の相対 Mach 数は $M_p = 0.53$ である。衝撃波が球と干渉する際は **regular** 反射と Mach 反射が起こるがこの光学系では反射の種類までは識別できない。はじめに上流側よどみ点を起点とする反射波が円状に広がり、垂直衝撃波が後流側淀み点に達すると、後流側淀み点を起点としてもう一つの反射波が円状に広がり、2つの反射波が遠方場に伝播する。後流では、垂直衝撃波との干渉終了後に渦構造の形成が始まる。時間の経過とともに球の後流に二本の縦渦構造が形成され(図 2 $t = 85$)、最初のヘアピン渦構造が形成されるなどの詳細な流れ場の特徴を明らかにすることができた。

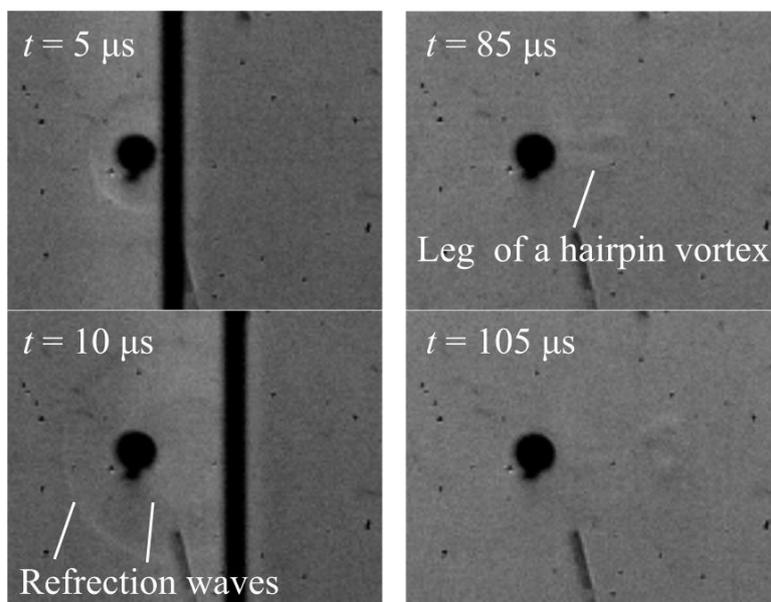


図 2. $M_s = 1.42$ における球と衝撃波の干渉の時系列変化のシュリーレンによる可視化。球の直径は 1.5 mm である。

衝撃波干渉直後からの球の軌跡から、球に作用した流体力の時間履歴を推定した。衝撃波 Mach 数は一定で球の直径を変化させて(すなわち粒子 Reynolds 数と Stokes 数が変化) 抵抗係数を推定した。定常状態での抵抗係数に関しては例えば圧縮性領域で広く利用されている Loth による抵抗係数モデルの予測値から分かる通り、連続領域では Reynolds 数と Mach 数の関数である。

図 3 に球の位置の時間履歴を示す。時刻は衝撃波と球が干渉した時刻を $t = 0$ とし、位置は衝撃波との干渉前の水平方向の位置を $x = 0$ とした。図 4 より衝撃波との干渉後に球の位置は二次関数的に、球が等加速度的に運動する。流れ方向の流体力の時間履歴を速度の時間履歴を時間微分して求めた加速度と運動方程式から計算した。流体力の時間履歴は計測した量(球の位置)の二階微分のため計測誤差による変動が大きかったが、衝撃波通過直後から 4 ms 以下の時間帯で大局的にはほぼ一定の流体力が作用しており、その時間帯での平均化された抵抗値が得られたことになる。計測誤差による影響を低減するため、位置の時間履歴を二次関数でフィッティングしその微係数から球に作用した平均の抵抗を計算した。亜音速における抵抗係数を Figure 4 に示す。従来より、衝撃波干渉実験で得られた抵抗係数は弾道飛行実験や風洞実験、あるいはそれらの実験データを基に構築された抵抗係数モデルで得られる抵抗係数よりも高い値を取ることが報告されている。本実験では、実験方法や計測系の改善により従来研究よりも高い時間・空間分解能で計測を実施できたと考えられるがその傾向は従来研究と同様であった。本研究で構築した実験系は流れ場の可視化も可能なため、将来的に可視化の精度をより高めて流れ場を取得することで流れ場と関連付けて抵抗係数が大きくなる要因を追求できると考えている。

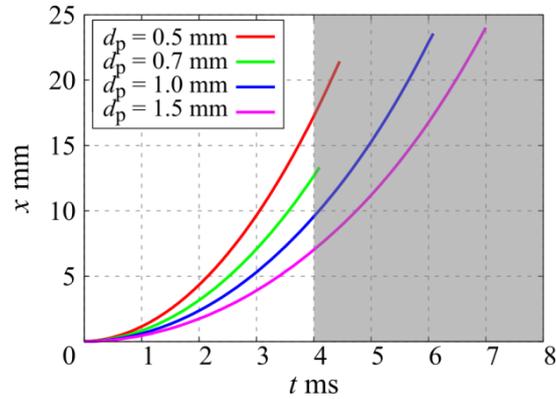


図 3. $M_s = 0.53$ における球の水平方向位置の時間履歴.

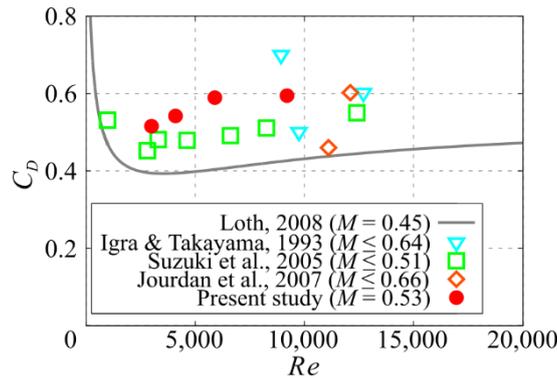


図 4 抵抗係数の比較.

3) 複数球周りの流れ場・流体力の解明

1)で製作した磁力支持放球装置は複数球の放球にも用いることができ、複数球の流れ場・空気力の計測を行った。ここでは、複数球の流れ場・空気力に関する研究成果を示す。

図 5 にクラスター球と $M_s = 2.02$ の垂直衝撃波の干渉のシュリーレン可視化画像を示す。今回構築した実験系では、球同士が接触した状態であれば、ある程度の自由度で任意の形態のクラスター球と衝撃波との干渉実験を行える。シュリーレン可視化により、垂直衝撃波と干渉したクラスター球が衝撃波の発生と後流への渦放出を伴いながら崩壊する様子を捉えた。また、個々の球の軌跡を追うことで球同士の流体力学的干渉による球の運動の変化を詳細に解析可能であることを示した。図 6 に示すように、クラスター上側の球は重力に逆らい上昇する。一方、非圧縮性流れでは球の後流に他の球がトラップされ、クラスター化を促進するような現象も知られるが、限られた条件ではあるが、本研究で調べた範囲ではクラスター化する傾向は見られなかった。今後、本研究で構築した装置を利用して試験を続けることで高 Mach 数混相流れにおける粒子のクラスター形成を明らかにできると期待される。

以上のように磁力支持放球装置と衝撃波管を組み合わせた実験において高感度・高速撮影の光学可視化計測を行い、高 Mach 数低 Reynolds 数流れにおける単体・複数球周りの流れ場と流体力計測の技術を確認し流れ場の基礎特性を解明することができた。

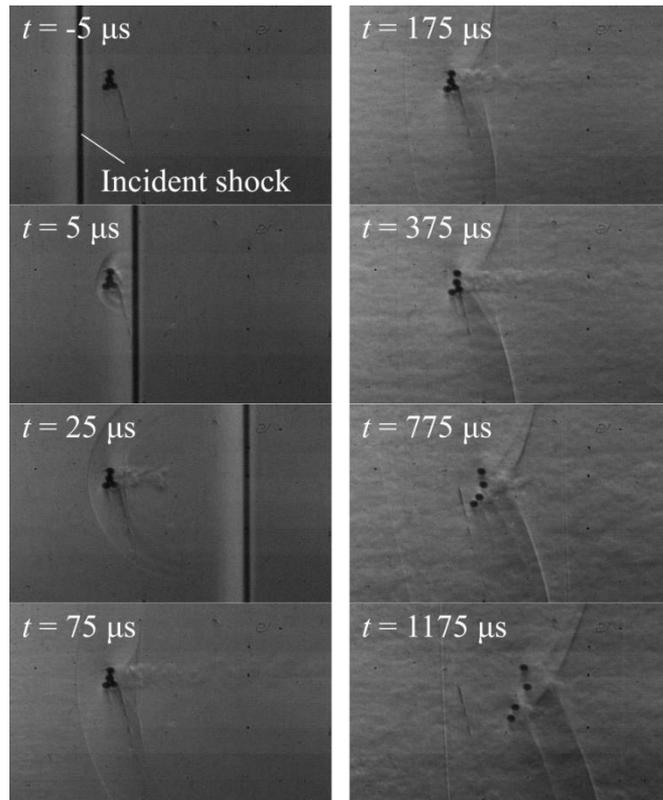


図 5. $M_0 = 2.02$ における球と衝撃波の干渉の時系列変化のシュリーレンによる可視化. 球の直径は 1.0mm である.

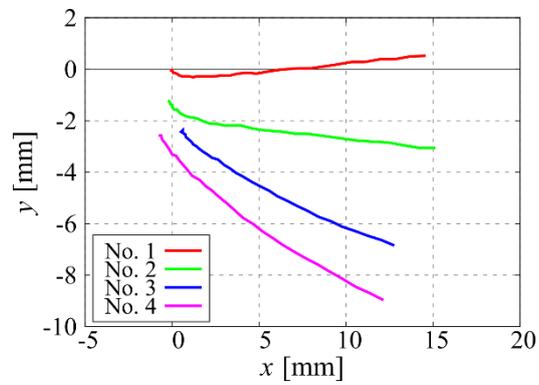


図 6 複数球の軌跡. 本研究での条件では球同士が離れる方向に動く. データは図 5 と同じである.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Nagata, A. Noguchi, T. Nonomura, K. Ohtani and K. Asai	4. 巻 30
2. 論文標題 Experimental investigation of transonic and supersonic flow over a sphere for Reynolds numbers of by free-flight tests with schlieren visualization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Shock Waves	6. 最初と最後の頁 139-151
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00193-019-00924-0	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 永田貴之, 野々村拓, 吉田真優, 高橋俊, 福田紘大
2. 発表標題 直接数値解析データベースを用いた粒子Reynolds数50-1000の圧縮性流れにおける微小粒子の空力係数および後流渦の解析
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永田貴之, 野々村拓, 大谷清伸, 浅井圭介
2. 発表標題 自由落下する小球と垂直衝撃波の干渉のシュリーレン可視化および球の抵抗係数の推定
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Nagata, Akito Noguchi, Taku Nonomura, Toshihiro Ogawa, Kiyonobu Ohtani, Keisuke Asai
2. 発表標題 Schlieren visualization of transonic and supersonic flow over a sphere at Reynolds number between 103 and 105 through free-flight tests
3. 学会等名 57th AIAA Aerospace Sciences Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019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	半田 太郎 (Handa Taro) (30284566)	豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (33924)	