

極超音速・低レイノルズ数流れにおける 球体空気抵抗モデルの確立

市 原 大 輔*

Aerodynamic Drag Coefficient of Microsphere in Hypersonic, Low Reynolds Number Flow

Daisuke ICHIHARA*

The aerodynamic drag coefficient of a micro-object under hypersonic, low-Reynolds number flow is investigated. An exploding foil accelerator was used for micro-object formulation and ejection. Input electrical energy ranged from 0.30 J to 0.55 J. The local Joule heating at the bridge section ablated the conductive layer, and the polyimide-made-micro-object was formulated. The blast wave accelerated the micro-object. From the time history of the micro-object velocity measured by the photonic Doppler velocimetry, the object reached the maximum speed of 2.39 km/s and gradually decelerated by the aerodynamic drag force. The estimated drag coefficient was 0.9, which is 1.8 times higher than the literature value due to the wave drag of the shock wave.

1. 研究背景

微小物体の高速射出技術は針なし注射に代表される医療機器や半導体など工業製品の加工，さらには惑星形成理論に関する室内実験など生体から宇宙まで幅広く活用される基盤技術である．特に宇宙工学においては打上げロケットの分離や人工衛星の放出機構などを駆動するための「衝撃スイッチ」として重要な要素技術である．また，植物細胞への遺伝子導入や人皮膚に対する無針注射などアグリ・バイオ領域における応用展開も進められている．装置の駆動や動植物細胞への遺伝子/薬剤注入を実現するためには標的への衝突速度を正確に見積もらなければならず，空気抵抗を介した射出物体の減速度が最重要パラメータと言える．一般に，前述の用途における射出物体の代表長さは1–100 μm 程度であり，秒速1 km以上の射出速度が求められる．この時，物体周りの流れ場はマッハ数（音速に対する飛行速度の比）は10を超え，かつ，レイノルズ数（粘性力に対する慣性力の比）は1000未満と計算できる．本事業ではこのような極超音速・低レイノルズ数流れにて物体に作用する空気抵抗の実測を目指すした取り組みを行ってきたのでその成果を報告する．

2. 実験装置

これまでに確立した微小物体の高速射出技術を用いて極超音速・低レイノルズ数流れを実現した．射出器の概要を図1(a)に示す．射出器は樹脂製基盤の上に厚み9 μm の導電層，厚み25 μm の隔膜層からなる3層構造である．導電層の中心部には断面積が局所的に減少する「ブリッジ部」を設けている．プラスト波の発生原理を図1(b)–(d)に示す．導電層に印加したパルス電流がブリッジ部にて集中することで局所的なジュール加熱が生じる．この時，ブリッジ部が瞬間的に熔融・気化することでプラスト波（=爆風）が発生しブリッジ部直上の隔膜層を高速で射出できる．

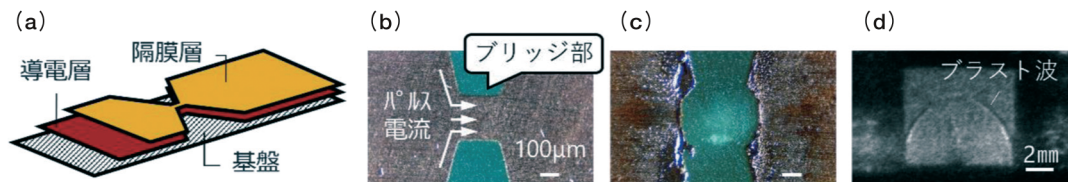


図1 (a) 粒子射出器の概要図，(b)–(d) 局所ジュール加熱によるプラスト波の発生．

射出された物体の速度は光Doppler式速度計（Photonic Doppler Velocimetry，以下PDV）にて測定した．PDVは観察対象の相対運動に起因したレーザー光周波数のDopplerシフト量に基づき観察対象の運動速度を測定する速度センサの一

2025年3月5日 受理

* 豊田理研スカラー

九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学研究系

種である。報告者はこれまでPDVの運用から誤差解析手法の確立まで本測定技術の習得に努めてきた¹⁾。PDVによる射出物体の速度測定に加えて、発生したプラスト波の可視化及び伝搬速度解析のため高速度カメラ撮影 (HPV-X2, 島津製作所) も並行して実施した。

3. 主要な研究成果

まず初めに高速度カメラ撮影による微小物体射出時のモンタージュ画像を図2に示す。カメラのフレームレートは5 Mfpsとした。パルス電流の供給による局所ジュール加熱が生じた結果ブリッジ部が白く発光していることが分かる (Frame (i))。続いて隔膜層の破断により微小物体が形成され (Frame (ii))、一定速度で飛行する (Frame (iii) – (v)) 様子が観察できた。

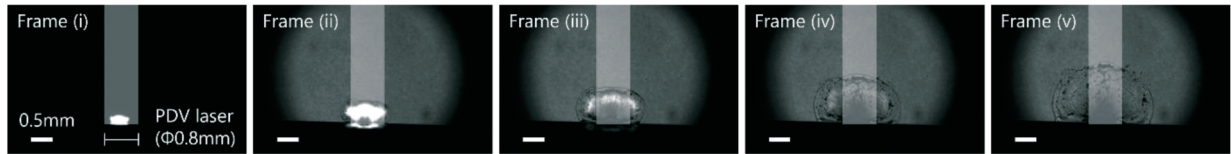


図2 高速度カメラ撮影による微小物体の形成と射出過程のモンタージュ画像。

モンタージュ画像解析により算出した微小物体の飛行速度とPDVによる飛行速度とを図3に示す。ブリッジ部での消費電力履歴(ログスキーコイルと高電圧プローブとにより測定)から隔膜層の破断時刻を特定しPDV装置と時刻同期した。PDVによる速度測定結果から微小物体は150 ns後に最高速度2.39km/sまで急加速している。一方でモンタージュ画像から算出した飛行速度は2.32 km/sであり両者は3%以内で一致していることからPDV測定の確からしさが確認できた。次にブリッジ部への供給電力と微小物体の射出速度との関係を図4に示す。供給電力の増加に伴い飛行速度が一定の割合で上昇していることから、射出物体の質量が一定であるとすると供給電気エネルギーから微小物体の運動エネルギーへの変換効率も一定と考えられる。PDVにより取得した速度履歴から得られる減速度および微小物体の質量、面積を基に算出した抵抗係数は約0.9であった。これは同レイノルズ数における球体の抵抗係数(約0.5)に対して1.8倍高い値であり物体前方に形成される衝撃波由来の造波抵抗が大きく寄与していると考えられる。このように本事業を通じて微小物体の速度履歴から抵抗係数を直接算出することが可能となった。今後は種々の投入エネルギー、ブリッジサイズに対して同様の計測、解析を実施し抵抗係数のデータセットを構築する。

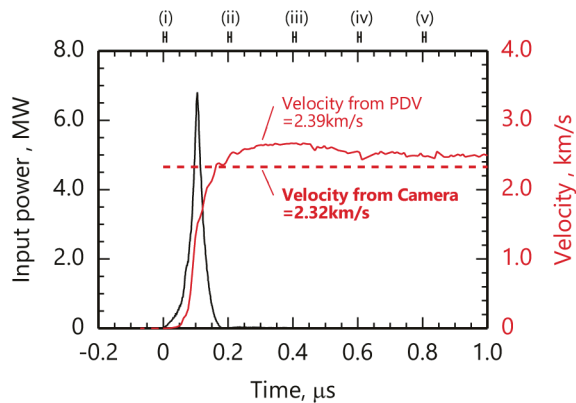


図3 ブリッジ部での消費電力履歴とPDVおよび高速度カメラ撮影で取得した微小物体の射出速度履歴。

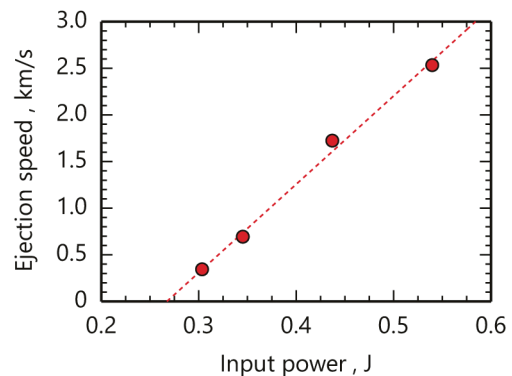


図4 供給電力と飛行速度との関係。

REFERENCE

- 1) D. Ichihara, *et al.*, *AIP Advances*, **11** (2021) 095203.