

電子ビーム励起によるマイクロノズル下流における中性粒子の相対密度分布測定

The measurement of relative density distribution at the downstream of a micronozzle using electron beam

○井澤 壮太・西井 啓太・菊池 航世・小泉 宏之・小紫 公也(東大)

○Sota Izawa, Keita Nishii, Kosei Kikuchi, Hiroyuki Koizumi, Kimiya Komurasaki (The University of Tokyo)

Abstract (概要)

It is widely known that thrust efficiency drops when the Reynolds number of a flow is lowered. In relation to this, many numerical calculations have been done to visualize the low Reynolds flow in a nozzle. On the other hand, not many experimental studies have been done and no study for 2-D measurement. In this study, we conducted an experiment to visualize low Reynolds flow at the downstream of a micronozzle in 2-D and tried to figure out the dependency of density distribution on Reynolds number.

1. 背景・目的

近年, nanosatellite や microsatellite などと呼ばれる超小型衛星が注目を集めており, 年々その打ち上げ数は増加している. このような超小型衛星は, 推進系を持たないものも多く, 大型衛星との相乗りで打ち上げられることが多いことから, 軌道の選択ができず, また軌道の維持ができないものが多かった. 他にも, フォーマーションフライトをはじめとする高度なミッションも実施することができない. これらの問題点を解決するために超小型衛星用の推進系が必要となり, その需要が高まっている¹⁻³⁾.

超小型衛星用の推進系の中でも構造が簡潔な例として, 推進剤をノズルから排出することにより推力を得るコールドガスジェットやレジストジェットがあげられる. これらにはノズルが用いられるが, ここで超小型衛星用のノズルはその容積的制約からマイクロノズルとなるものが多い. ここでマイクロノズルにおけるノズル内の流れは, 代表長が短くなることから, レイノルズ数が一般的に小さくなる. 低レイノルズ数流れにおいては, 非粘性準一次元の仮定によるノズルの理論式から導出される推力よりも実推力が著しく低下することが知られている⁴⁾. Pearl や Bruccoleri らの実験や計算結果では, ノズル内流れのレイノルズ数が 200 以下の領域においては, 比推力効率が著しく低下している^{5,6)}.

このようなマイクロノズル流れの特性を解明するために, 数値計算により, ノズル内外の密度分布を計算した研究は多数存在する. 例えば, Titov らが eDMSC 法を用いて, レイノルズ数が 10000 のオーダーのノズル内外の計算を行った[7]. 他にも, Shershnev らがレイノルズ数 50, 350 のマイクロノズル

内流れの密度分布を計算している⁷⁾.

しかしながら, 実測により中性粒子のマイクロノズル内外の流れを研究した例はほとんど存在しない. 密度を測定する方法として, シュリーレン法があげられるが, マイクロノズルのような希薄な流体に対する適応は難しい. 他方法として, レーザー励起を用いて励起光を観測する方法も考えられるが, 中性粒子を基底状態から励起させるのは難しい. このように実測が難しい低レイノルズ中性粒子流体の密度分布を測定した研究として, Rothe らが電子ビームを用いて内外の密度分布を測定した例が挙げられる. しかしながらその測定は 1 次元に限定されている⁸⁾.

そこで, 本研究では Rothe らと同様の電子ビームを用いた測定により, 2 次元でのマイクロノズル下流における中性粒子の相対密度分布測定法の確立・検証と密度分布のレイノルズ数依存性の有無の検証を目的として実験を行った.

2. 実験装置

2.1 真空装置

本研究における実験はすべて, 直径 1 m, 長さ 1.2 m のステンレス製真空チェンバーの中で行った. 真空ポンプには, ロータリーポンプとターボ分子ポンプを用いており, 実験中の背圧は, 実験条件によって変化するが, 10^{-1} Pa- 10^{-2} Pa 程度であった.

2.2 ノズルとアルゴン供給系

ノズルはアルミ A5052 を切削加工して作られたものであり, スロート径が 2.6 mm で開口比は 13 である. .

アルゴンの流量は増すフローコントローラー(MFC)を

用い調整を行った。アルゴンタンクから供給されたアルゴンはMFCを通して、樹脂チューブによりチャンバー内に導入され、そのまま直接ノズル上流側に導入された。

2.3 電子銃

本研究で用いた電子銃は自作である。方式は熱電子方式であり、フィラメントとして $\Phi 0.2\text{ mm}$ のタングステンワイヤを用いている。図1にその外観を示す。

電子の加速電圧は最大1.5 kVまで調整可能であり、電子ビーム電流は最大で3 mAほどであった。実際に電子を加速し、雰囲気圧のアルゴンが発光している様子を図2に示す。

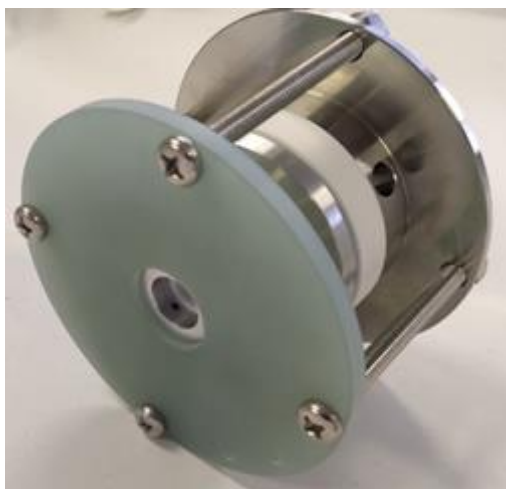


図1 本実験に用いた電子銃の外観



図2 電子銃から電子ビームを照射している様子、右にある電子銃から右のコレクタに向かって電子が加速されている

2.3 実験装置の配置

図3、図4に実験装置の配置図を示す。下方に電子銃を配置し、上方に向けて電子ビームを照射する。電子ビームはスリット付きコレクタでシート状になったあと、その上方にあるコレクタで回収される。ノズルはスリット付きコレクタと

コレクタの間に配置され、プルームとシート状ビームが交わる領域で発光する。前述の発光はチャンバーの窓を介して、チャンバーの外に配置したカメラにより撮影を行う。

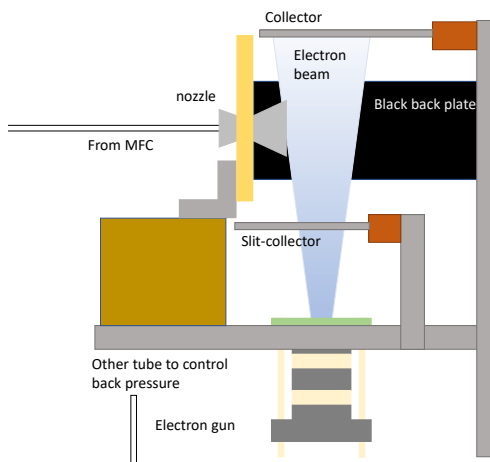


図3 実験装置を正面から見た図、カメラ視点と一致している

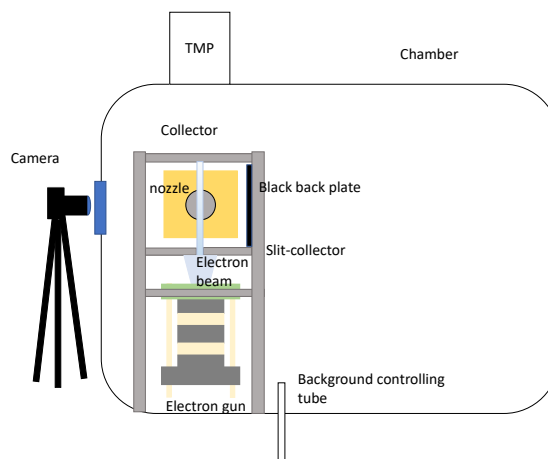


図4 実験装置を横から見た図

3. 実験方法

3.1 測定原理

本研究では電子銃を用いてアルゴンの密度分布測定を行った。観測部に電子ビームを照射すると、気体分子に電子が衝突する。この時電子の持つ運動エネルギーが分子の内部エネルギーへと変換され、分子は励起状態になる。励起状態が終了するまでに、励起状態の分子がほかの粒子と衝突し、電子との衝突により得たエネルギーを失わないとすると、蛍光を発生する。この他粒子との衝突によりエネルギーを失う粒子と蛍光を発生することでエネルギーを失う粒子の割合は、

気体の密度に依存する．電子との衝突により，粒子に与えられるエネルギーの総量を W とし，励起光発生率を Φ とし，発生する蛍光強度を I_f とすると，以下のような関係式が書ける．

$$I_f = W\Phi \quad (1)$$

ここで， W は幅広い粒子密度に対して，

$$W \sim \rho \quad (2)$$

という関係をもつことが知られている⁸⁾．ここで一般的には Φ は ρ の関数であるが，1 Torr のオーダーよりも小さい密度の時，励起状態が終了するまでの時間が，他の粒子と衝突するまでの時間と比べると非常に短くなるため， Φ は ρ に対して定数となる^{9,10)}．従って，発光強度と密度は以下のような線形な式で表すことができる．

$$I_f = \rho\Phi \quad (3)$$

よって，励起蛍光の発光強度を観測することで，気体の密度を測定することができる．

3.2 解析方法

解析に用いた写真は RAW 画像である．RAW 画像に対して行った処理は，ブラックレベル補正と Brayer 配列 1 組を 1 画素ととらえる簡易的デモザイク処理である．どちらの処理も python のライブラリである rawpy を用いて行った．

Rawpy により現像した画像から以下のように発光強度を計算した．

- ① まず rawpy で解析により，RGB 配列が得られ，それが輝度配列 I に変換される．

$$\mathbf{X}_{RGB} = [(R_0, G_0, B_0), (R_1, B_1, G_1), \dots] \quad (4)$$

$$I_k = \frac{1}{3}(R_k + G_k + B_k) \quad (5)$$

$$\mathbf{I} = [I_0, I_1, I_2, \dots] \quad (6)$$

- ② 次に，測定法の手順②で撮影した電子加速時の輝度配列 10 つの平均と測定法の手順③で撮影した非加速時の背景輝度配列を差し引いた．

$$I' = \frac{1}{10} \sum_{i=0}^9 I_{\text{加速},i} - \frac{1}{10} \sum_{i=0}^9 I_{\text{非加速},i} \quad (7)$$

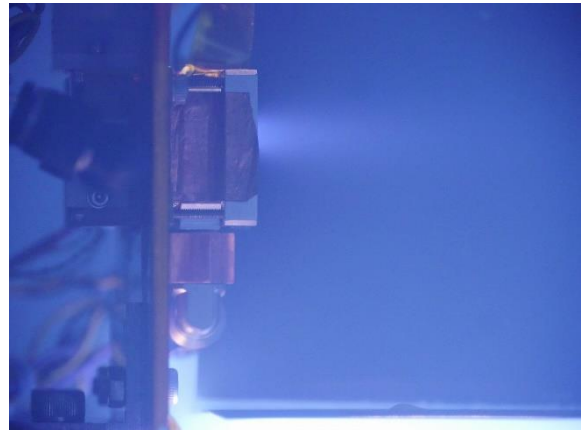


図 5 電子加速時の発光の様子

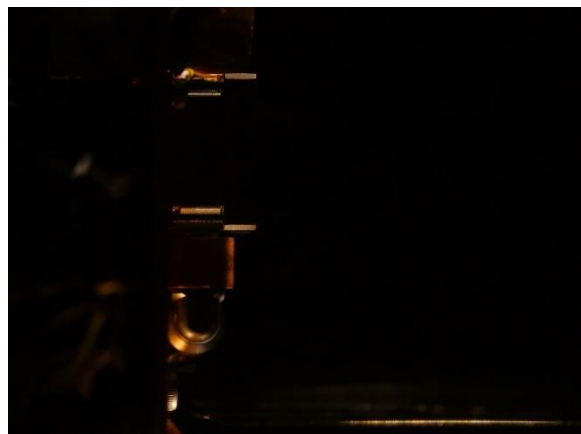


図 6 電子非加速時の様子

3.4 実験条件

以下表 1, 表 2 に実験条件，パラメータを示す．カメラの設定は，実験を通じて一定である．レイノルズ数はマスフローコントローラーで流量を変化させることで調整を行った．なお，ノズルから流す流量と背景に流す流量の合計が一定になるように調整している．

また表 3, 表 4 に フィラメントとコレクタ類の電位，電流条件を示す．チェンバーとコレクタはともに GND に接地され，フィラメントに -615 V の電位がかかった状態で電子を加速している．

表 1 カメラのパラメータ

シャッタースピード	ISO	F 値
4 s	6400	5.1

表 2 Re 数, 背圧, 実流量

Re 数	背圧	ノズル流量	背圧流量
83	0.57 Pa	$1.8 \times 10^2 \text{ /mgs}^{-1}$	$0.9 \times 10^2 \text{ /mgs}^{-1}$
75	0.53 Pa	$1.6 \times 10^2 \text{ /mgs}^{-1}$	$1.1 \times 10^2 \text{ /mgs}^{-1}$
67	0.51 Pa	$1.4 \times 10^2 \text{ /mgs}^{-1}$	$1.3 \times 10^2 \text{ /mgs}^{-1}$
58	0.51 Pa	$1.3 \times 10^2 \text{ /mgs}^{-1}$	$1.4 \times 10^2 \text{ /mgs}^{-1}$
50	0.52 Pa	$1.1 \times 10^2 \text{ /mgs}^{-1}$	$1.6 \times 10^2 \text{ /mgs}^{-1}$
42	0.51 Pa	$0.9 \times 10^2 \text{ /mgs}^{-1}$	$1.8 \times 10^2 \text{ /mgs}^{-1}$

表 3 フィラメントパラメータ

フィラメント電圧	フィラメント電流
-615 V	4.1 A

4. 結果

図 7-図 12 に実験における測定結果を示す。ノズル出口におけるノズル軸上の輝度で正規化した相対密度分布である。背景の密度分布の影響で上下非対称な密度分布になっていることがわかる。

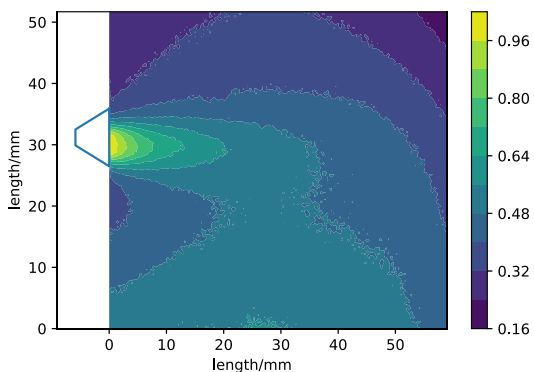


図 7 Re=83 の時の実験結果, ノズル出口におけるノズルの軸上の輝度で正規化を行った相対密度分布である。背景の密度分布に影響されて分布が上下非対称になっていることがわかる

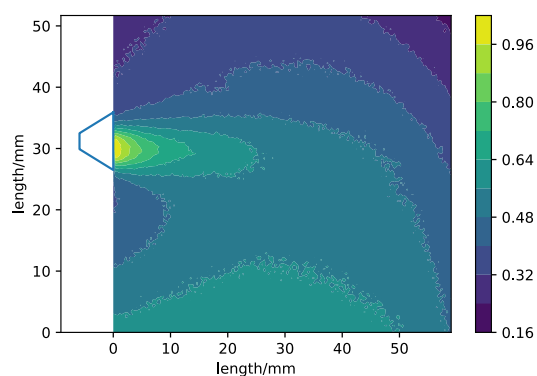


図 8 Re=75

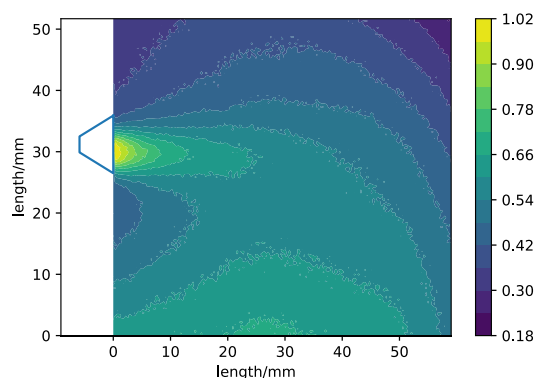


図 9 Re=67

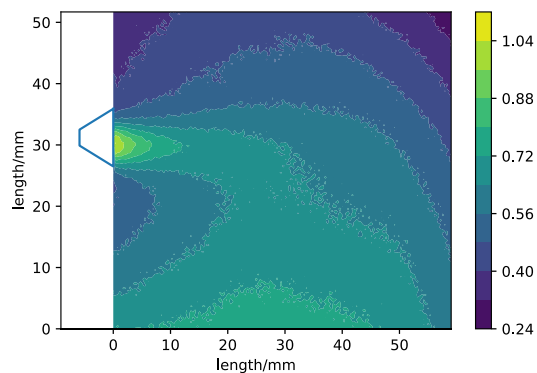


図 10 Re=58

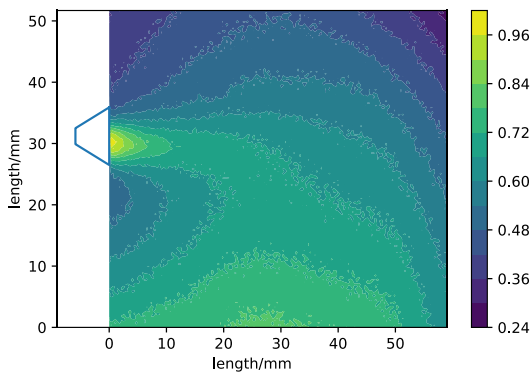


図 11 Re=50

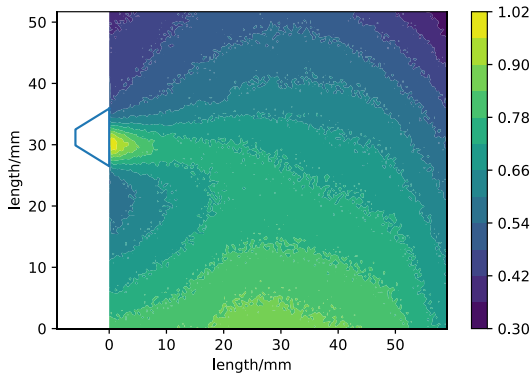


図 12 Re=42

5. 考察

ノズルから排出されるプルームは上下非対称な結果であった。これは、背景密度分布の影響のであると考えられる。本実験において、ノズルの上部 50 cm の距離にはターボ分子ポンプが配置してあり、下部 40 cm の位置には、背圧調整用のチューブが配置してある。その結果、下部から上部に向かって背景の密度分布が生じていると考えられる。本測定で測定した結果は、上記背景密度分布とノズルから排出されるプルームとの重ね合わせされたものである。従って、ノズル上部より下部の方の密度が高い上下非対称な密度分布になったと考えられる。

図 13 にノズル出口部分における一次元相対密度分布の結果を示す。ただし縦軸はノズルの軸上の輝度で、横軸はノズルの半径で正規化したものになっている。レイノルズ数が下がるにつれて、ノズルの中心付近の密度が下がり、ノズルの壁付近の密度が上がっているのがわかる。つまり、レイノルズ数が低くなると、より壁付近の粒子割合が増加することがわかる。

ノズルで発生する運動量推力は以下の式で表現できる。

$$F = \int 2\pi\rho(r)u(r)^2rdr$$

ただし、 ρ, u はそれぞれ、ノズル出口における密度、プルームの速度である。一般的に、境界層の影響で壁付近の粒子の速度が低下することを考慮すると、図 13 より、レイノルズ数が低い場合、より速度が遅い粒子の割合が多いことがわかる。その結果、全体として運動量推力が減ることがわかる。この結果は、レイノルズ数の低下とともに推力効率が低下するという、先行研究の結果⁴⁾と矛盾していない。従って、本測定結果には妥当性があると判断できる。

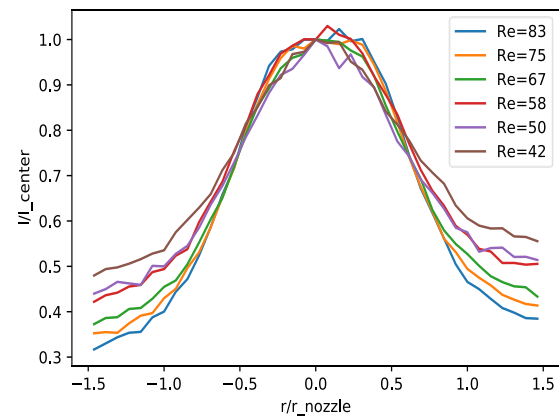


図 13 ノズル出口における相対密度分布、レイノルズ数が大きいほうが中心部分に粒子が多いことがわかる

6. 結論

本研究により、以下の知見が得られた。

- 本測定法では背景の密度分布の影響を受ける
- レイノルズ数が低下するとよりノズルの壁付近の粒子数割合が増加するという密度分布のレイノルズ数依存性が存在
- 上記傾向は、先行研究の結果と矛盾せず、妥当性があると考えられる

7. 参考文献

- 1) A. Poghosyan and A. Golkar, "CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 88, pp. 59-78, 2017.
- 2) C. Williams, B. Doncaster, J. Shulman, "SpaceWorks ' 2018 Nano / Microsatellite Market Forecast, 8th Edition," 2018.
- 3) K. Lemmer, "Propulsion for CubeSats," *Acta Astronautica*, vol. 134, pp. 231-243, 2017.
- 4) A. D. Ketsdever, "Experimental and Numerical Determination of Micropropulsion," *AIAA JOURNAL*, vol. 43, no. 3, 2005.
- 5) J. M. Pearl, W. F. Louissos and D. L. Hitt, "Thrust Calculation for Low-Reynolds-Number Micronozzles," *Journal of Spacecraft and Rocket*, vol. 54, no. 1, pp. 287-298, 2017.
- 6) D. L. H. William F. Louissos, "Viscous Effects on Performance of Two-Dimensional Supersonic Linear Micronozzles,"

JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS, vol. 45, no. 4,
pp. 706-715, 2008.

- 7) A. Shershnev , A. Kudryavtsev, “Kinetic simulation of near field of plume exhausting from a plane micronozzle, ” Microfluid Nanofluid, 2015.
- 8) D. E. ROTHE, “Electron-beam studies of viscous flow in supersonic nozzles,” AIAA Journal, 1971.
- 9) G. E. O., “Measurement of the density distribution in a rarefied gas flow using the fluorescence induced by a thin electron beam,” Tech. rep, 1962.
- 10) C. L. Premislow, A. J. Sheppard , J. M. Little, “Time-resolved electron beam fluorescence for measuring neutral particles in EP plasmas, ” *The 35th International Electric Propulsion Conference*, 2017.