

1E06 超音速気流中におけるパルスアーク放電によって発生する圧力変動の計測

○眞鍋一希，胡誉騰，森浩一（大阪公立大学）

Measurement of Pressure Rise Caused by Pulse Arc Discharge in Supersonic Airflow
Kazuki Manabe, Yuteng Hu and Koichi Mori (Osaka Metropolitan University)

Key Words : Supersonic Flow, Arc Discharge, Pressure Rise

Abstract

In order to analyze the feasibility of airbreathing plasma jet engine, interaction between arc discharge and supersonic flow field in rectangle discharge room is experimentally examined. Pressure Rise at the downstream of the discharge room about two discharge conditions is measured with changing the flow conditions. Consequently, pulse pressure rise is observed. It means thrust is generated.

1. 背景と目的

近年，電動航空機において，「大気吸い込み式プラズマジェット推進」を利用することが検討されている[1][2]．これは，成層圏以上の大気を推進機内に吸い込みプラズマを発生させ，大気へのエンタルピー付与と電磁力を介した運動量発生によって推力を発生する推進方法である．この推進方法は，プロペラを用いた推進方式とは異なり，高速飛行時の空力的制約を受けない．また，化学反応を必要としないため低密度空気中で使用可能である．このことから，大気吸い込み式プラズマジェット推進は，高高度，超音速での飛行に適しており，超音速や極超音速で飛行するスペースプレーンや宇宙往還機の実現を可能にすると考えられる．本推進機の概要を図 1 に示す．

この推進方式の実現性を解析するため，矩形断面放電室内の超音速気流中において発生させたアーク放電と流れ場との相互作用について実験的に調べている．先行研究では，放電特性や放電室内のプラズマについての研究がなされ，超音速流中での放電とプラズマの生成が確認された[3]．しかし，放電が流れに及ぼす影響を定量的に把握した研究は存在していない．推進機の性能を評価するには推力などの性能を把握する必要があるが，正確な推力計測には，大掛かりな実験装置や数値解析が必要となる．このため，本研究では，簡易的に推力の発生を確認するとともに，将来的に数値解析などの参考とするため，放電室下流の圧力変動を計測し，その特性を明らかにすることを目的とする．本研究では圧力センサを流れの下流に設置し，放電に伴うピトー圧の変化を計測した．

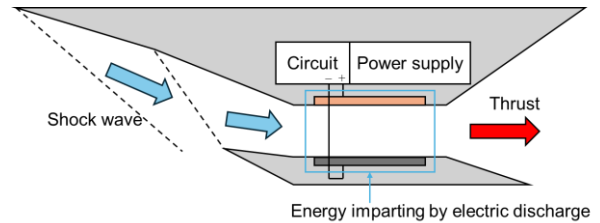


図 1 大気吸い込み式プラズマジェットの概要図

2. 圧力変動の発生原理

放電による空気の加熱及び電磁力による空気の後方への加速を考える．流れがある場合，加熱された空気が膨張し，後方に流れることで圧力変動が発生する．

また，電磁力を介した運動量の発生は以下のようにモデル化される[4]．図 2 に示すように，放電発生時，電極間には，電極に流れる電流によって磁場が誘起される．電極間の微小空間に流れる電流密度を j ，誘起された磁場を B とすると，単位体積あたりの電流には

$$f = j \times B \quad (1)$$

で表される力が下流方向にかかる．いま，簡単のため2次元で考える．座標系を図 2 のように設定する．放電室の流れ方向の長さを l ，電流方向の長さを a とし，陽極の厚さを b_1 ，陰極の厚さを b_2 とする．とある点 (x, y) におけるその上下の電極を流れる電流 I は，放電室内の電流が地点に関わらず一様であるとすると，放電室に流れる全電流を I_{all} として，

$$I(x) = I_{all} \left(1 - \frac{x}{l}\right) \quad (2)$$

と表される．ここで，電流は電極の中央に流れていると仮定し，この点の上下以外の電流による磁界を

無視すると、この点の磁界の強さ H は、紙面手前向きに、

$$H(x,y)=\frac{I(x)}{2\pi\left\{y-\left(-\frac{a}{2}-\frac{b_2}{2}\right)\right\}}+\frac{I(x)}{2\pi\left\{\left(\frac{a}{2}+\frac{b_1}{2}\right)-y\right\}} \tag{3}$$

と表される。磁束密度の大きさ B は、これに真空の透磁率 μ を掛けて、

$$B(x,y)=\mu H(x,y) \tag{4}$$

となる。ここで、電流密度 j の大きさは、2次元であるから、

$$j=\frac{I_{all}}{l} \tag{5}$$

となり、放電室中の電流にかかる力は、放電室下流向きに、

$$\begin{aligned} F &= \int_0^l \left(\int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} jB(x,y)dy \right) dx \\ &= \frac{\mu I_{all}^2}{4\pi} \left\{ \ln \frac{\left(a+\frac{b_1}{2}\right)\left(a+\frac{b_2}{2}\right)}{b_1b_2} \right\} \end{aligned} \tag{6}$$

となる。この力によるプラズマへの運動量付与が空力的加熱と並ぶ圧力変動の発生原因となる。

式(6)に今回の実験の条件である、 $a=13\text{mm}$ 、 $b_1=0.5\text{mm}$ 、 $b_2=1\text{mm}$ を適用し、電流を $I_{all}=200\text{A}$ として計算すると、 $2.4\times10^{-2}\text{N}$ の推力が発生することになる。また、 $I_{all}=600\text{A}$ として計算すると、 0.21N の推力が発生することになる。推力は電流の2乗に比例するため、電流の増加によって、さらに大きな推力が期待できる。計算上は、電磁推力は流れの条件に依存しないため、高高度を含む様々な飛行条件での推進機の作動が期待される。

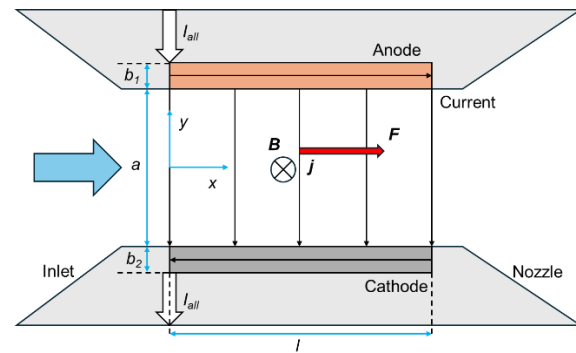


図 2 電磁的な推力の発生原理

3. 実験方法

図 3に本実験で用いた実験装置の概要を示す。真空チャンバの最低圧力は50Pa程度である。真空チャンバには空気取り入れ口が設置されており、流入する空気の量を流量コントローラで調整できる。流入した空気はラバルノズルによって超音速まで加速さ

れる。ラバルノズルの下流に放電室が設置されている。放電室は一辺が13mmの正方形断面の管で、全長は50mmである。放電室内には、長さ30mmの銅製の陽極とタングステン製の陰極が露出している。電極は放電回路に接続され、電極間で放電を起こすことができる。今回、チャンバ内圧力を500Paに設定し、超音速流なしで放電した場合（条件1）と、ブースターポンプを起動させたうえで超音速流を放電室に流して放電した場合の計測を行った。流れありの場合、動圧を1.5kPa（条件2）及び1.9kPa（条件3）に設定して実験を行った。先行研究で測定された流れありの時の放電室中心部の動圧及びマッハ数を表 1に示す[5]。

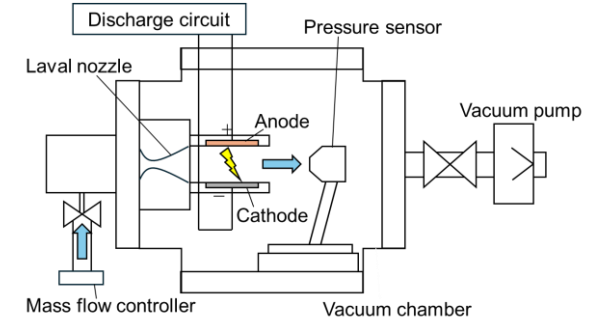


図 3 実験装置概要図

表 1 流れの条件

条件	動圧 (kPa)	静圧 (kPa)	マッハ 数	質量流量 ($\times 10^{-3}\text{kg/s}$)
2	3.6	0.48	2.1	0.93
3	4.8	0.60	2.1	1.2

使用した放電回路を図 4に示す。主放電コンデンサには、静電容量100 μF の電解コンデンサ及び内部抵抗の小さい静電容量100 μF のフィルムコンデンサを用いた。コンデンサの等価直列抵抗は、100Hz時で電解コンデンサが1.2 Ω 、フィルムコンデンサが0.0 Ω であった。充電は、電解コンデンサが300V、フィルムコンデンサが200Vで行った。瞬間的な大電流放出による部品への影響を軽減するために、LCローパスフィルタを主放電コンデンサに接続した。コンデンサだけでは電極間のアーク放電を達成できないため、高圧スタータを用いて電極間にグロープラズマを生成したのち、電流の増加とともに極板間プラズマの抵抗がさらに低下し、コンデンサからプラズマに流れる電流がさらに増加するため、グロープラズマがアークプラズマに移行し、放電室を動作させた。

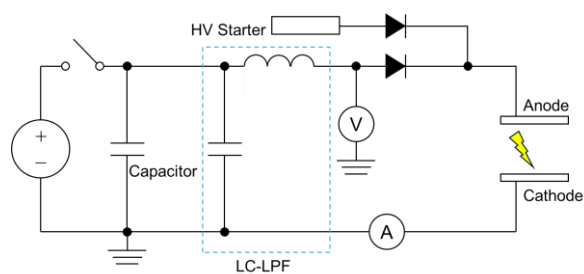


図 4 放電回路

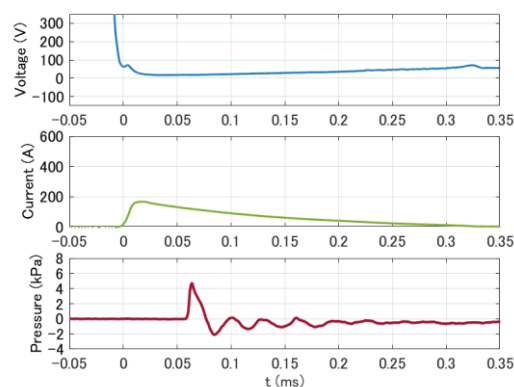
圧力計測は、放電室出口から25mmの場所において、圧電式圧力センサを用いて行った。圧力センサの測定部の直径は5.54mmである。これを真空チャンバ内のステージに固定した。

4. 実験結果

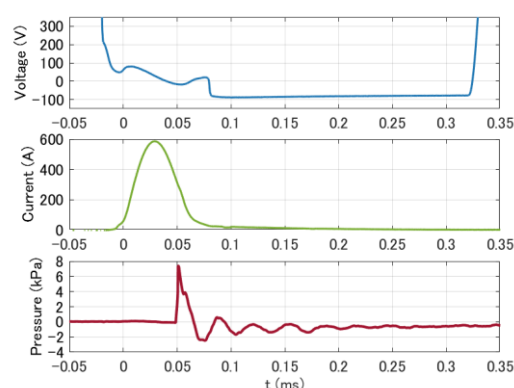
図 5にローパスフィルタ部の電圧及び放電電流と計測した圧力変動の例を示す。圧力変動は、放電前の圧力を基準とした値である。

まず、放電波形について考える。電解コンデンサを使用した場合、最大200A程度の電流が流れた。フィルムコンデンサを使用した場合、最大600A程度の電流が流れた。放電の持続時間は電解コンデンサ使用時のほうが長かった。これは、コンデンサの内部抵抗の違いによるものと考えられる。

図 5において、放電開始後、一定時間経過後に瞬間的な圧力の増加が見られた。この変化は、放電による加熱及び電磁力により空気が膨張、加速されたことによるものと考えられる。その後圧力の波形は振動した。この振動は、圧力センサ自身の振動、またはセンサを取り付けているマウントの振動と考えられる。いずれの場合も、放電開始から一定時間経過後に短時間推力が発生したと考えられる。



(a)電解コンデンサ使用時、条件3



(b)フィルムコンデンサ使用、条件3

図 5 放電波形と圧力変動

流れの条件と最大圧力変動の関係を図 6に示す。使用したコンデンサに関わらず、流れありの圧力変動は、流れなしに比べて大きかった。これは、流れの無い場合は、放電室の前後に加熱された空気が流れ出すのに対し、流れありの場合は加熱された空気がすべて後方に流れたことや、流れがあることにより、時間的に早く圧力変動の波がセンサに到達したことが原因と考えられる。

流れありの中で比較すると、動圧を高く設定した条件3の圧力変動が大きかった。これは、流量の増加によって加熱による空気の膨張が大きくなったことによるものと考えられる。

フィルムコンデンサ使用時のほうが、電解コンデンサ使用時より圧力変動が大きかった。これは、電流の増加に伴う電磁力の増加と、コンデンサの内部抵抗が低いことによる放電電力の増加によるものと考えられる。

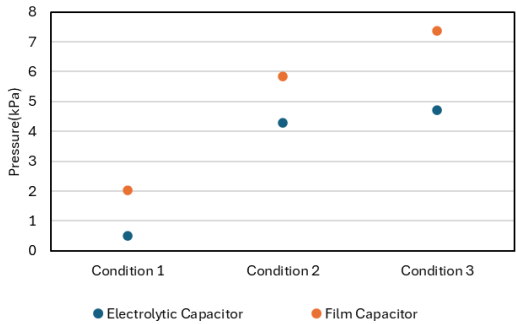


図 6 流れの条件と最大圧力変動の関係

4. まとめと今後の課題

今回の実験を通して、超音速流中の放電室出口下流における圧力変動を観測することができ、放電による推力の発生と、複数の流れのパターン及び放電のパターンによる圧力変動の変化を確認することができた。

今後の課題としては、定量的に推力を評価できる推力計測の実装があげられる。また、放電波形と推力の関係なども調査していきたい。

参考文献

[1] 平田一博,小幡昌宏,森浩一:” エアブリージングプラズマジェット推進における超音速気流特性,” 第53回流体力学講演会/第39回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム,オンライン,日本,1D15,2021.

[2] Hirata, K., Obata, M. and Mori, K.: Characteristics of Supersonic-Flow in Air-Breathing Plasma Jet Propulsion, 53th Fluid Dynamics Conference / 39th Aerospace Numerical Simulation Symposium, Online, Japan, 1D15, 2021 (in Japanese).

[3] Hu, Y. and Mori, K.: Fundamental Study about Air-breathing Pulse Magnetoplasma dynamic Thruster. The 34th International Symposium on Space Technology and Science, Kurume, Japan, ISTS 2023-b-50, 2023.

[4] 竹ヶ原春貴, 荒川義博, 都木恭一郎, 橘武史, 田原弘一, 枝光敏章:” マイクロパルスプラズマスラスタ”, 日本航空宇宙学会誌, 52 巻 (2004) 610 号

[5]佐橋孝英:” 超音速MPDスラスタ内の噴流構造と放電プラズマの挙動”, 大阪公立大学, 2024