120 DC 放電プラズマが超音速流れに及ぼす影響

Effects of DC Discharge Plasma on a Supersonic Flow

○学 屋名池 勇太 (芝浦工大)

正 角田 和巳 (芝浦工大)

Yuta YANAIKE, Shibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135-8548
Kazumi TSUNODA, Shibaura Institute of Technology

Characteristics of a plasma actuator driven by direct-current discharge were studied experimentally in a Mach 3 supersonic flow. The discharge is generated between two small pin electrodes mounted on a Laval nozzle wall. Current and voltage measurements indicated the generation of the discharge at low power consumption. It was confirmed that the wall static pressure increased beside an anode and decreased just behind the anode for a 100mA discharge. Furthermore, the increases in stagnation pressure and flow velocity were observed close to the electrode surface. It was suggested that enthalpy elevation due to the Joule heating of the flow led to the change in the stagnation pressure and increase in the flow velocity.

keywords: Plasma Actuator, Supersonic Flow, DC Discharge, Stagnation Pressure

1 緒言

プラズマアクチュエータは、気流中に置かれた物体表面等に局所的なプラズマを発生させて、周辺の流れ場を制御するデバイスであり、機械的可動部が無く時間応答性も極めて高いという特徴をもつ。そのため、プラズマアクチュエータの実用化には高い関心が寄せられており、低速流から高速流に至る広範な流れ場を対象として種々の放電形態を利用したプラズマアクチュエータが開発されてきた⁽¹⁾。中でも、低圧下の超音速流に対しては、直流グロー放電によって駆動するプラズマアクチュエータを適用することが多く、衝撃波制御への応用を目指した研究が進められている⁽²⁾⁽³⁾。しかし、超音速流中で安定した放電を維持するためには、マッハ数に代表される流体諸量に加えて、電極の形状・配置・材質等がプラズマに及ぼす影響についても明らかにし、各パラメータを最適化することが必要である。

そこで本研究では、矩形断面のノズル壁面に電極が配置されたプラズマアクチュエータをマッハ数3の超音速流中で稼働させ、電極周辺に生じる圧力場の変化を実験的に調べることで、DC 放電プラズマアクチュエータの超音速流制御効果に関して検討した。

2 実験装置および実験方法

本研究で使用した矩形断面を有するラバルノズルの形状と座標系を図1に示す。ノズル全長は445mmで、スロートはノズル入口を原点として $x=90\text{mm}$ の位置にあり、 $x=303\text{mm}$ 以降は等断面流路を構成している。ノズル高さは30mm(一定)、ノズル幅は入口で80mm、スロートで10mm、等断面流路で45mmとなっており、ノズル壁面には5mm間隔で静圧孔が設けられている。プラズマアクチュエータとして機能する部分は、 $270\text{mm} \leq x \leq 360\text{mm}$ の領域で、絶縁用のベークライトとプラズマ観察用の石英ガラスで作製されている。この領域のノズル壁面には、直径1.5mmの小孔が5mm間隔で3列にわたって配置されており、ピン状電極の設置孔もしくは静圧測定孔として利用される。本実験では、 x 軸上の2点($x=300\text{mm}$, 305mm)に直径1.5mmの銅製電極を壁面から0.5mm突出させた状態で取り付け、直流高電圧電源(グラスマンジャパンハイボルテージ製, EQ1R1000, 0-1kV, 0-1000mA)を用いて電極間に1kV程度の電圧を印加することにより、プラズマを発生させた。また、電極と対向する壁面にも圧力孔を設け、ピトー管を挿入し電極上方の全圧を測定した。

本装置では、ノズル下流に設置した全容量1.976 m^3 の真空タンクとの圧力差によって、ノズル入口から吸引された大気が最大マッハ数 $M=3$ の超音速流れまで加速される。壁面静圧孔およびピトー管から取り出された圧力は、ピエゾレジスティブ絶対圧センサ(KISTLER 製, 4043A1)とアンプ(KISTLER 製, 4603A)によって電圧信号に変換され、AD変換器(Interface 製, LPC320724)を介してPCに取り込まれる。また、電極間電圧および電流は、電源装置から出力された信号をAD変換器(Interface 製, LPC-361216)を用いてサンプリング周波数1kHz

で計測し、ブロー開始のトリガー信号とともに上記と同じPCに記録する。

3 実験結果および考察

3.1 放電プラズマの安定性

図2は、 $x=300\text{mm}$ を陰極、 $x=305\text{mm}$ を陽極とした場合に計測された放電電流・電圧値の時間変化であり、ブロー開始後1.1~1.3sと2.9~3.1sの測定結果についても拡大表示し、それぞれ比較した。放電中の電流変化を見ると、放電開始から約2s間は高周波変動が頻出しているが、その後放電終了までは変動の出現回数が少なくなり、設定電流の100mAで比較的安定した電流値を示している。このとき、1.1~1.3sではスパイク状の電流パルスが約0.05s間隔で発生しているのに対し、2.9~3.1sでは電流パルスの発生頻度が減少していることから、放電開始直後のプラズマは、短時間で生成と消滅を繰り返す不安定な状態にあると考えられる。この間、電圧は放電を維持するために100~1000Vの間で周期的な変動を繰り返し、平均値としては500~600V程度の電極間電圧となっている。

3.2 放電プラズマの時間応答性

図3は、前節と同じ条件下で測定された電極間電圧、放電電流、壁面静圧の典型的な時間変化を示したものである。ただしここでは、1kHzでサンプリングされたデータを0.1s間隔で平均した結果について比較を行った。ブロー開始後1~4sまでの3s間がアクチュエータ作動時であり、この間約100mAの設定放電電流が持続されている。また、電流値を維持するための電極間電圧は約600~800Vとなっており、アクチュエータの消費電力は60~80W程度と低く抑えられている。

図3(a)に示した静圧変化は、各電極横(下流に向けて左側)での計測結果であり、アクチュエータ作動開始時間の静圧を基準として比較した。陰極横($x=300\text{mm}$)の静圧はアクチュエータ作動中ほとんど変化していないが、陽極横($x=305\text{mm}$)の静圧は放電開始後に約15Pa上昇し、放電終了後は低下していることがわかる。これは、プラズマが発生したとき電極間に流れる放電電流によってジュール発熱が生じ、電極付近の気体が加熱されたことによるものと考えられる。

Fig.1 Experimental apparatus

すなわち、加熱された気体が膨張し、電極周辺の境界層が厚くなると、衝撃波と境界層の干渉と同様に局所的な静圧上昇が引き起こされる可能性がある。したがって本実験の場合も、プラズマの生成と消滅に伴い電極周辺で気体が一時的に加熱され、静圧の上昇・低下が生じたと推測される。

図 3(b) の静圧変化は、陰極の 5mm 上流 ($x=295\text{mm}$) と陽極の 5mm 下流 ($x=310\text{mm}$) における計測結果である。陰極上流の静圧はアクチュエータの作動中ほとんど変化していないが、陽極下流の静圧は放電開始とともに低下を続け、放電終了と同時に上昇している。このときの静圧低下量は約 25Pa であり、電極横の静圧とは異なる挙動が確認された。この現象は、電極下流の流れが再加速される可能性を示唆しており、その要因として、電極上での局所的な境界層厚さの変化や、プラズマ中に発生する静電気力の効果⁽⁴⁾などを挙げることができるが、詳細については現状では不明である。また、電極周辺における静圧の変化量が、放電開始直後から徐々に増加する傾向にあることを考えると、図 3 で観察された放電の生成・消滅による影響を超音速流れが直接受けることはなく、プラズマの加熱等による流れへの干渉が、累積的に効果を及ぼしていると推測される。

Fig.2 Time trace of discharge current and voltage

Fig.3 Typical time traces of discharge voltage, discharge current and static pressure increment

3.3 電極周辺の全圧変化

電極周辺の全圧は、プラズマアクチュエータの性能を評価する重要なパラメータとなることから、図 4 に電極周辺における壁面垂直方向の全圧分布を示す。なお、ここではピトー管による測定値を直接プロットし、放電開始前の全圧に対する変化量 ΔP の z 方向分布を比較した。図 4(a)~(c) より、陰極上流、陰極上、陽極上では、壁面から 6mm ほど上方までの範囲において全圧上昇を確認できるが、特に陰極上では全圧上昇が広範囲に及んでおり、最大で 200Pa 程度に達している。アクチュエータの作動中に供給された電力は流れ場を加熱することになるが、このエネルギーは気流のエンタルピー増加をもたらすため、電極上方において全圧上昇が生じ、その影響が陰極上流にも及んでいると考えられる。一方、図 4(d) の陽極下流における全圧分

布は (a)~(c) の測定結果と異なる傾向を示しており、壁面近傍で最大 235Pa 程度の全圧低下が生じている。実験では、主流方向の流体運動によって発光領域が陽極下流側へ流されるような状態が観察されていることから、それに伴い陽極下流の流れ場の構造が変化すれば、全圧は低下する可能性がある。ただし、このような全圧の挙動を明らかにするためには、放電時における流れ場全体の状態を可視化観測等によって調べる必要があると考えられる。

図 5 は、放電開始前後における流速の変化量 ΔU を z 方向に示したもので、正值は放電開始後に流速が増加したことを表している。放電の影響で全圧上昇が確認された領域では、流速が最大で 2.5m/s 程度 (マッハ数で $M=0.013$ 程度) 上昇していることが確認できる。一方、全圧低下が観察された陽極下流においては、最大で 8m/s 程度 (マッハ数で $M=0.03$) 流体が減速されており、全圧の上昇・低下と流体の加速・減速との対応が明らかとなった。

以上のように、電極周辺で圧力変化が誘起され、その近傍では局所的に流速が変化していることから、DC 放電プラズマで駆動されるプラズマアクチュエータを用いると、数 m/s オーダーではあるが超音速流れの流速制御が可能であると考えられる。

Fig.4 Stagnation pressure distributions around electrodes

Fig.5 Velocity distributions around electrodes

4 結言

DC 放電を利用して超音速流中でプラズマアクチュエータを駆動させ、電極周辺の圧力変化を調べた。本研究で得られた結果を要約すると、下記の通りである。

1. 放電開始直後のプラズマは、短時間で生成と消滅を繰り返す不安定な状態にあると考えられる。
2. プラズマアクチュエータの駆動中、壁面静圧は陽極横で上昇し、陽極下流では低下した。これは放電に伴うジュール加熱によって、電極上の境界層が変化したことが一因と考えられる。
3. 放電開始とともに、陰極上流、陰極上および陽極上の上方近傍において、200Pa 程度の全圧上昇と約 2.5m/s の流速増加が確認された。これは放電に伴う気流のエンタルピー上昇に起因すると考えられ、DC 放電プラズマアクチュエータによる超音速流制御の可能性が示唆された。

文献

- (1) Moreau, E., "Airflow control by non-thermal plasma actuators," Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 40(2007), pp.605-636.
- (2) Shin, J., Narayanaswamy, V., Raja, L. L. and Clemens, N. T., "Characterization of a Direct-Current Glow Discharge Plasma Actuator Low-Pressure Supersonic Flow," AIAA Journal, Vol. 45, No.7(2007), pp. 1596-1605.
- (3) Shin, J., Narayanaswamy, V., Raja, L.L. and Clements, N.T., "Characteristics of a plasma actuator in Mach 3 flow," AIAA Paper 2007-788(2007).
- (4) Shin, J., Mahadevan, S., "Forcing mechanisms in supersonic flow actuation achieved by direct-current surface glow discharge plasma" Aerospace Sci. Tech. (2010)