

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 8 月 24 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22014

研究課題名（和文）プラズマジェット推進を用いた電動航空機システムの概念設計研究

研究課題名（英文）Conceptual design research of electric aircraft systems using plasma jet propulsion

研究代表者

森 浩一（Mori, Koichi）

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：90375121

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,200,000 円

研究成果の概要（和文）：ICP、電極間交流放電のいずれの場合も、超音速気流中において放電を維持できることがわかった。電極間交流放電の場合には、ピトー圧ならびにトリプルプローブを用いたプラズマの電子温度、電子密度の計測までを行った。その結果として、電極間放電では、電極から下流に向かって緩やかにピトー圧の上昇が見られることから、重粒子の温度が下流に向かって緩やかに上昇していると推察される。一方、電子温度はほぼ一定のままであり、電子温度  $\gg$  重粒子温度の状態、電子から重粒子へのエネルギー伝達が緩やかに発生している非平衡流が生じていると考えられる。この非平衡性は、気流のマッハ数、放電電流によって影響を受けることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、超音速気流中で準定常プラズマを生成したものであり、外部流に比べて流速が遅くなる境界層内部でプラズマを生成した過去の研究とは異なり、超音速の速度をもつ外部流において、プラズマの生成・維持を実現できたという点において、新しい発見があった。この成果は、超音速電気航空機の研究開発に端緒を切り拓くものであり、大きな技術的、社会的意義をもたらすものだと考えている。

研究成果の概要（英文）：As a result of our study, it was found that both ICP and electrode-discharge are possible in a supersonic flow. For the electrode-discharge in a supersonic flow, we measured the pitot pressure and the electron density / electron temperature using an Electrostatic Triple Probe. From these measured results, the pitot pressure increased gradually toward the downstream. This result suggest that the temperature of the heavy particles increase gradually. On the other hand, the electron temperature is almost constant in the downstream. These results suggest that the plasma supersonic flow is thermally non-equilibrium flow, in which electron temperature  $\gg$  heavy particle temperature. This non-equilibrium features are affected by the flow Mach number and discharge current.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：電気航空機 電気推進 プラズマ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年『電動航空機』の研究開発が活発化している。航空推進機の電動化は、二酸化炭素の排出を低減するだけでなく、推進機の小型・軽量・高効率化により、革新的な航空機設計を実現することが期待されている。しかし、電動モーターで回転翼を駆動する推進方式が前提となっており、これでは電動化の潜在的な可能性を十分に引き出しているとは言えない。回転翼の性能は、空気力学的制約に縛られ、低空・低速飛行にしか使えず、飛躍的な技術革新は期待できない。

### 2. 研究の目的

本研究では、大気を放電によってプラズマ化し、これを流体力学的もしくは電磁力学的に加速する航空推進の新しい方法論を模索する。放電方式には様々なものが知られているが、例えば成層圏近傍の空気密度で効率良く放電する方法は多く、高密度空気を必要とする化石燃料の燃焼とは対照的である。プラズマ生成による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は、化学反応・空気力学の制約を受けず、高高度、つまり空気抵抗が少ない、遷～超音速の高速度の電動飛行を実現し、航空工学に大きな変革をもたらす。応用としては、旅客航空機に加え、再使用型宇宙往還機などが考えられる。極超音速飛行におけるスクラムジェット推進の代替として、直流放電と自己誘起磁場による電磁加速によって推進力を得る案である。従来計画より高い高度での飛行は、極超音速飛行最大の課題である空力加熱を低減する。一方、高速流(100-1000m/s)とプラズマ生成・加速プロセスの相互作用は、プラズマ科学の未踏領域でもあり、大変興味深い。

このような新しい航空機概念設計には、高速プラズマの基礎物理に加え、電源・電力供給法、機体形状、飛行条件(高度・速度)など、様々な要素の可能性を検討し、統合する総合工学的探索が必要である。さらに、プラズマの生成・加速法には複数の可能性が考えられるが、これをどのように選択し、どのように航空推進として機能させるかは、全く未知で、プラズマ物理における探索的研究が必要である。

本研究では、①超音速気流中における ICP 放電、②超音速気流中における電極間交流放電、の2種類の実験研究を行い、プラズマ生成と、超音速気流との相互作用について調べた。

### 3. 研究の方法

#### (1) 超音速流中における ICP 放電実験

図1に本研究に用いた実験システム全体の概念図を示す。図の左側が上流側、右が下流側となっている。ガスタンクから流れ出した流体は、計測室前に設置されたラバルノズルを通して超音速に加速され計測室に流入する。本研究では、マスフローコントローラー(azbil社製)を用いて質量流量制御する導入されたガスは、ラバルノズルによって超音速に加速される。

加熱による流れの変化レイリー流れの考え方を用いて考えていく。レイリー流れにおいて、熱閉塞までの最大投入熱量を評価する。

$$q_{max} = \frac{(M^2 - 1)^2}{2(1 + \gamma)M^2 \left\{ 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right\}} \cdot c_p T_{01} \quad (1)$$

一方、プラズマへの投入電力  $W$  は高周波電源投入電力で、それを質量流量で除することにより、流体に加えらるる比パワー  $q_{coil}[J/kg]$  を求められる。

$$q_{coil} = \frac{W}{\dot{m}} \quad (2)$$

#### (2) 超音速気流中における電極間交流放電

図2に本研究で用いた実験装置の概略図を示す。超音速噴流は、真空チャンバーの空気流入口より導入した空気をラバルノズルによって加速させることで生成している。ラバルノズルの内部設計は、スロート後の放射流を一様流に変換するように、Foelschの解析的な手法[3]に従って行った。ノズルの設計マッハ数は  $M = 4, 5, 6$  で、出口直径は  $D = 20[\text{mm}]$  となる。また、実験の座標系はノズル出口中心を原点とし、下流方向を  $x$  方向、半径方向を  $r$  方向とする。ピトー圧計測は  $x = 10 \sim 34[\text{mm}]$  で  $r = 0 \sim 12[\text{mm}]$  の範囲で計測を行い、プローブ計測は  $x = 9 \sim 15[\text{mm}]$  の範囲で計測を行った。

電極は、ノズル出口から下流に  $5[\text{mm}]$  に設置した、電極間距離  $2[\text{mm}]$  の一対の電極での有極放電によって行なった。電極は直径  $d = 5[\text{mm}]$  で、先端角度  $22.9[^\circ]$  の銅電極を使用した。両電極間には、イグナイターによって電力を供給しており、最大印加可能電圧は  $6000[\text{V}]$ 、最大供給電流は  $27[\text{mA}]$  となる。実際の印加電圧と供給電流を計測するために、放電回路に分圧抵抗と電流検出抵抗を組み込み、オシロスコープで計測を行った。

供給電流は、いずれのノズルを使用するときも最大にして実験を行ったが、設計マッハ数  $M = 5$  ノズルを使用する時、供給電流による違いを比較するため、供給電流  $13.5, 27[\text{mA}]$  の2つの条件で実験を行った。

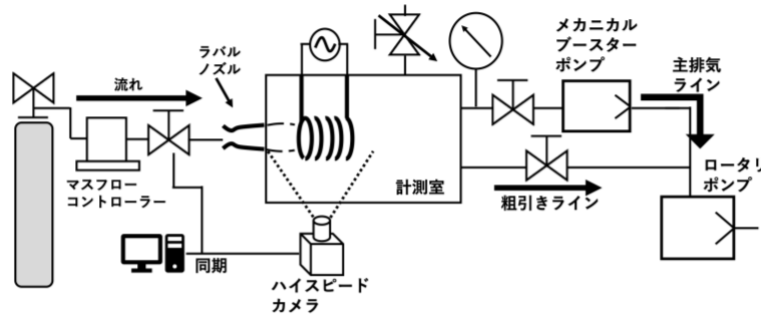


図1 超音速気流中における ICP 放電実験装置

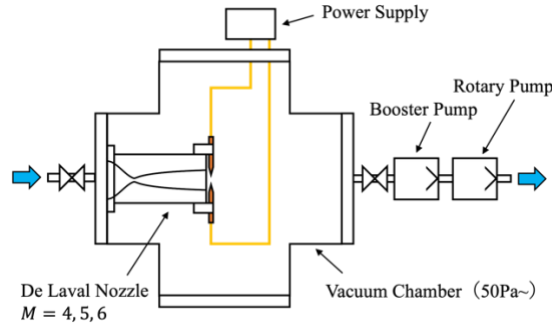


図2 超音速気流中における電極間交流放電実験装置

#### 4. 研究成果

##### (1) 超音速流中における ICP 放電実験

流量を固定して、電圧を変えた時のプラズマの様子を以下に示す。電源の印加電力は、式(1)の  $q_{max}$  で無次元化してある。印可電力を上げていくと、ノズル付近やコイル上流側の発光強度が増していくことがわかる。また、コイル後流領域に注目すると、 $q_{coil}/q_{max} < 1$  においては、特に強く発光領域がコイルの下流側出口付近に発生しており、超音速噴流中でプラズマ加熱が実現できていると考えられる。さらに投入電力を上げ、 $q_{coil}/q_{max} \sim 1$  付近では、発光領域が一気に上流へ移動する様子が見られ、これは熱閉塞のためにプラズマ生成領域がラバルノズル内部の低いマッハ数の領域で発生していると推察される。

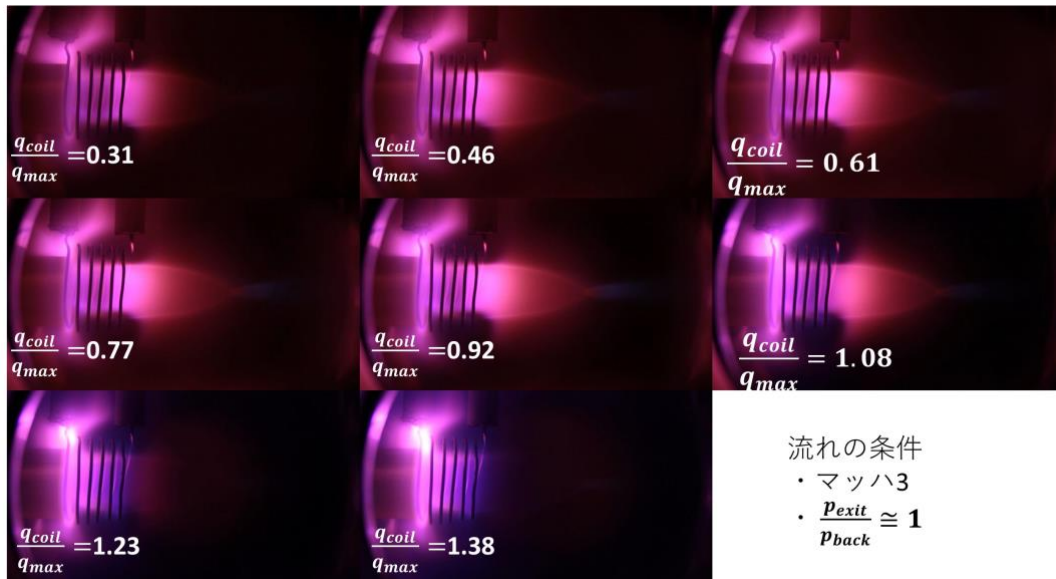


図2 超音速噴流中に生成したプラズマの発光像

##### (2) 超音速気流中における電極間交流放電

図1に  $M_d = 5$  ノズル使用時電極間の電圧や電流の測定値を示す。ただし、左縦軸は放電電圧で、

右縦軸は放電電流で、横軸は経過時間となる。放電電圧と放電電流はそれぞれ赤い線と青い線で示されている。本実験ではイグナイターを用いて放電しているため、供給できる電流 $I_s$ は27 [mA]以下、供給電流の変化率 $dI_s/dt$ は7.28 [A/s]以下となる。計測できた電圧と電流値を用いて、各実験条件での平均投入電力を求めたものを

表 1 に示す。

生成したプラズマの形状を把握するために、小型一眼レフカメラ (Canon 製 EOS Kiss x10) と高速カメラ (Photon 製 FASTCAM 1024PCI) を用いて撮影を行なった。図 2 は小型一眼レフカメラを用いて撮影した (a) 流れなし、(b)  $M_d = 4$  ノズル使用時、(c)  $M_d = 5$  ノズル使用時、(d)  $M_d = 6$  ノズル使用時の結果である。ただし、電極の位置は黄色の線を用いて示しており、また、流れの方向は青い矢印で示されている。

流れがない場合、電極先端表面には均一なプラズマの発光が確認できるが、流れがある場合、発光領域が電極の間に移動し、発光も強くなることがわかった。電極表面での発光領域も、噴流の速度が速く、圧力の高い上流側でなく下流側となることがわかった。また、 $M_d = 6$  ノズルを使用する場合、流量が少なく、噴流の圧力が低いため、発光領域は噴流の外側に移動したこともわかった。

図 3 に、放電後の中心軸上でのピトー圧変化率で、(a) ノズルを変更、(b) 設計マッハ数  $M_d = 5$  のノズル使用時に供給電流を変更時の結果を示す。ただし、縦軸はピトー圧の変化率で、横軸は計測点の座標となる。 $M_d = 4, 5$  のノズルが生成した噴流で放電する時の変化率を比較すると、もともとの噴流の全圧が低くなると全圧が減少し始める領域は後方になることがわかった。これは、流れの全圧が低くなると、粒子の衝突回数が減少し、放電で加速された自由電子がエネルギーを重粒子に付与するのに必要な誘導時間内に下流に流され、放電による加熱が反映し始めるのに距離が必要であることが原因だと考えられる。

また、同じ噴流での放電供給電流を減少すると、噴流への加熱量が減少し、同じ計測点でのピトー圧の変化率も減少することがわかった。

**Error! Reference source not found.**に、プラズマ診断結果の一例の、 $M_d = 5$  のノズル使用時の中心軸上  $x = 13$  [mm] での (a) 電子温度  $T_e$ 、(b) 電子密度  $N_e$  の結果を示す。ただし、(a) の左縦軸は電子温度、(b) の左縦軸は電子密度、両方の右縦軸は放電電流、横軸は経過時間となる。印加電圧が正の場合、高正電圧な陽極とアースとなる陰極の間に放電が発生し、電子温度  $T_e$  の計算値は15000 ~ 25000 [K]の間に収束する傾向を示し、グロー放電プラズマの文献値に概ね一致していることがわかった。

表 1. 各実験条件での平均投入電力

| 設計マッハ数 (電流)           | 平均投入電力   |
|-----------------------|----------|
| $M_d = 4$ (27 [mA])   | 8.80 [W] |
| $M_d = 5$ (27 [mA])   | 6.65 [W] |
| $M_d = 5$ (13.5 [mA]) | 2.65 [W] |
| $M_d = 6$ (27 [mA])   | 5.70 [W] |

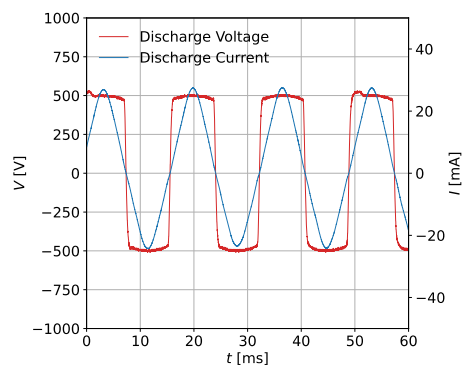


図 1.  $M_d = 5$  ノズル使用時の放電特性

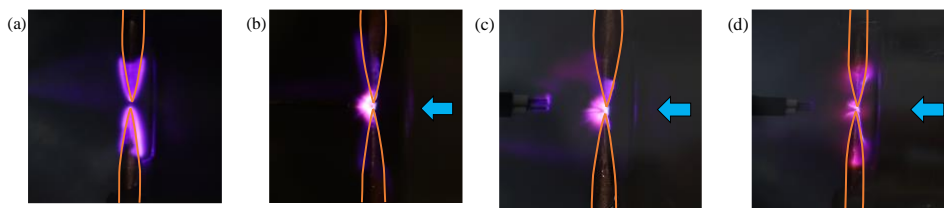


図 2. 小型一眼レフカメラによる撮影結果 (F5.6 1/80 秒 ISO800) : (a) 流れなし、(b)  $M_d = 4$  ノズル使用時、(c)  $M_d = 5$  ノズル使用時、(d)  $M_d = 6$  ノズル使用時

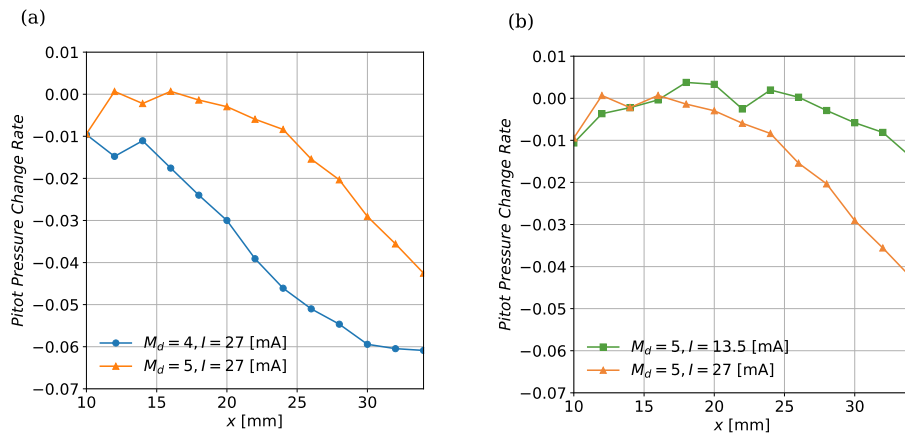


図 3. 中心軸上のピトー圧変化率：(a) ノズルを変更，(b)  $M_d = 5$  のノズル使用時に供給電流を変更

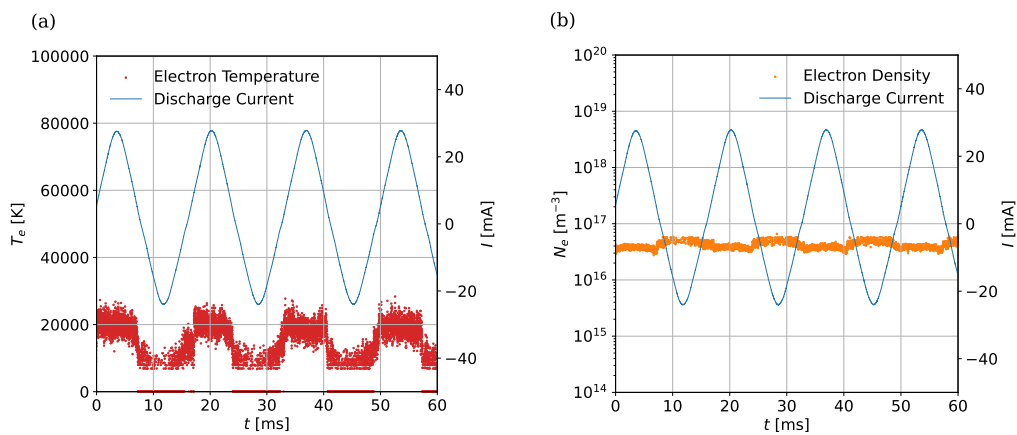


図 4.  $M_d = 5$  ノズル使用時に  $x = 13$  [mm] での：(a) 電子温度，(b) 電子密度の計算値

ICP、電極間交流放電のいずれの場合も、超音速気流中において放電を維持できることがわかった。電極間交流放電の場合には、ピトー圧ならびにトリプルプローブを用いたプラズマの電子温度、電子密度の計測までを行った。その結果として、電極間放電では、電極から下流に向かって緩やかにピトー圧の上昇が見られることから、重粒子の温度上昇が下流に向かって緩やかに発生していると推察される。一方、電子温度の変化は緩やかであることから、電子温度  $\gg$  重粒子温度の状態、電子から重粒子へのエネルギー伝達が緩やかに発生している非平衡流が生じていると考えられる。この非平衡性は、気流のマッハ数、放電電流によって影響を受けると考えられる。

今後、詳しい実験的研究ならびに、現象の物理解釈を可能とするための数値シミュレーション研究を、研究手法の両輪として進めることにより、高速気流中におけるプラズマの発生・維持の物理に対する理解を深め、大気吸い込み式プラズマ推進の実現可能性を議論するに十分な体制を整えることができると考えている。

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<br>Mori Koichi  | 4. 巻<br>-         |
| 2. 論文標題<br>Laser Propulsion Using a Porous Carbon Heat Exchanger | 5. 発行年<br>2022年   |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Propulsion and Power                        | 6. 最初と最後の頁<br>1~4 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.2514/1.B38613                      | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>-         |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>多嶋俊貴、森浩一                 |
| 2. 発表標題<br>エアブリージングプラズマ推進の検討および予備実験 |
| 3. 学会等名<br>宇宙科学技術連合講演会              |
| 4. 発表年<br>2020年                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>平田一博、小幡昌宏、森浩一                        |
| 2. 発表標題<br>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        |
| 3. 学会等名<br>第53回流体力学講演会/第39回航空数値シミュレーション技術シンポジウム |
| 4. 発表年<br>2021年                                 |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>平田一博、小幡昌宏、森浩一、松井信、長田孝二        |
| 2. 発表標題<br>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 |
| 3. 学会等名<br>第65回宇宙科学技術連合講演会               |
| 4. 発表年<br>2021年                          |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|