

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：32407

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654205

研究課題名(和文) プラズマ支援燃焼を用いたエアロスパイクによる流体制御

研究課題名(英文) Flow control using air-spike with plasma-assisted combustion

研究代表者

服部 邦彦 (Hattori, Kunihiko)

日本工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90261578

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、飛行体(移動体)の熱負荷や空気抵抗を抑制するためにプラズマ源を用いたエアロスパイクの効果を調べることである。この研究の中でこのプラズマ領域はマイクロ波によって追加熱され、さらにプラズマ領域を拡大させる。そしてこのプラズマと中性粒子流の相互作用領域の違いが空気抵抗にどう影響するかを調べる。これらの目的を達成するために、プラズマ生成・維持、風洞、マイクロ波重畳などいくつかのテーマにわけ、実験装置の整備と実験を行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to examine the effect by using the plasma source for the air-spike to control the heat load and the air resistance of the flight body or movable body. In addition, this plasma area is expanded to the plasma source by irradiating the micro wave. The influence of the interaction of plasma and the neutral-particle-flow to the effect of aerodynamic is examined. In this study, we developed an experimental system, and carried out the experiment separately for some themes. There is a need for further research to better understand an aerodynamics effect using a plasma air-spike.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：大気圧プラズマ 流体制御 プラズマ支援燃焼 エアロスパイク

### 1. 研究開始当初の背景

近年開発が進んでいる宇宙帰還機や超音速飛行体などの設計において過酷な熱環境下での正常な動作や材料の耐久性などの問題が挙げられる。その対策として飛行体の先端を鈍頭形状にすることで空力加熱を減少させている。しかし、飛行体先端を大きなノーズ半径にすると空気抵抗が増大し、エンジンの推力の増強、燃料消費の増加が起こり輸送できる物資量が制限される。そこで鈍頭形状の空力抵抗を減少させるために大きなノーズ半径を用いるのではなく、鈍頭先端に鋭い突起物(スパイク)をつけることによって空気抵抗が著しく減少するとの報告がある[S.Bogdonoff et al., J. of Aerospace Sciences, Vol.26, No.2, pp.65-74(1959)].。そして、このスパイクを金属固体に置きかえたプラズマなどの熱源を用いることが提案されている。

一方、J.R.Rothらは、飛行翼表面に誘電体バリア放電で大気圧グロープラズマを生成し電気流体効果によって飛行翼表面の境界層を制御し空力抵抗を減少させる実験を行っている[J.R.Roth, Phys. of Plasmas, Vol.10, No.5, 2117-2126(2003).]。このようにプラズマの新しい応用の一つとして空力制御という研究が始まっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、飛行体(移動体)の熱負荷や空気抵抗を抑制するためのエアロスパイクや飛行翼表面の境界層を制御するなどのプラズマを用いた気流制御を行い、高速気流中における空気力学効果を実験的に検証することである。ここで提案する方法は、移動体の前方にエアロスパイクのような局所的な熱源プラズマを生成した上にさらにマイクロ波による追加加熱を行い放電領域を拡大するプラズマ支援燃焼を付加する。これにより、プラズマと中性粒子流の相互作用領域を拡大し高速気流中でのプラズマ生成・制御および空気力学効果について調べる。

### 3. 研究の方法

前記の目的を達成するために、以下のような研究方法を進めた。

- (1) プラズマ源の開発と気流中での放電特性
- (2) 静電プローブ法による大気圧プラズマ測定
- (3) マイクロ波を重畳した大気圧プラズマの生成と挙動
- (4) 気流中に生成した大気圧プラズマにマイクロ波を重畳した場合の特性

最終的には(4)項がこの研究の目標成果であるが、まずは各個別要素を確立し、それらを総合的に組み合わせる実験を行うことにした。

各項目に対して具体的内容を記す。

- (1) プラズマ源としては、様々な形状や放電

様式があるが、ここでは、高周波パルス電源を用いたバリア放電、ネオントランスを用いた火花放電、低電圧大電流電源によるアーク放電を試みた。電極の形状として直線状、円筒状、市販の点火プラグなどを用いた。

また、この放電部に気流を流すための小型の風洞を製作した。

そして、気流による放電部周辺の気流がどのように変化するかを調べるために、スモークワイヤ法を実施し、可視化した。さらに、放電部の気流中での空気抵抗を測定するための測定器を製作した。

- (2) 大気圧プラズマを測定する方法の一つとして静電プローブ法による測定を試みた。上記の電極放電ではなく、火災中の弱電離プラズマ測定を試み、大気圧下でプローブ法の測定を確認した。
- (3) 金属容器内にプラズマ源を設置し大気圧プラズマを点火し、それにマイクロ波を照射する。このプラズマを追加加熱し、プラズマ領域を拡大するための装置を整備した。
- (4) に関しては、今回は実験装置が整備できなかったため実験には至らなかった。

### 4. 研究成果

- (1) プラズマ源の開発と気流中での放電特性

#### 電極の形状

放電電極の形状は3種類を製作し、それぞれの電極に電源を取り付け放電方法を変えた。

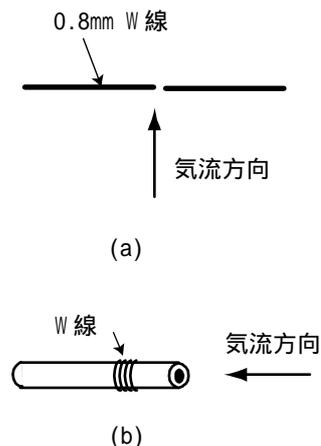


図1 放電部

図1(a)は、タングステン線(外径0.8mm)を対向電極とし、両端に各種電源をつないだ。ネオントランス(50Hz, ~6kV, 20mA)による火花放電、高周波パルス放電(10kHz, ~20kV)、DCアーク放電(60V-2A, 40V-20A)を行った。火花放電、高周波パルス放電、DCアーク放電のいずれも大気圧中で放電したが、DCアーク放電は安定に維持することができなかった。そこでDCアーク放電を維持するために電流

を増加させたが、本実験で用いた市販の溶接機用電源は、電流値が大きすぎるため電極が溶融し長時間の放電ができなかった。

さらに、市販されている自動車用点火プラグをそのまま用いた。

これらの放電部に流速 2m/s ~ 20m/s の気流を流した結果では、放電部の発光が流速の増加に伴って下流に流される様子が観測できたものの、これらの流速に対して放電電圧に大きな変化は現れなかった。

図 1(b)は、セラミック管（外径 6mm × 内径 4mm）に中心導体として銅（直径 3mm）を挿入し、セラミック外周に W 線（外径 0.8mm）を巻き付けた電極である。この電極形状の場合、高周波パルス放電のみプラズマ生成が確認できた。電圧の増加に従って発光部分が増加していった。W 線と中心導体の位置関係の依存性はほとんどなかったが、中心導体上に W 線がある場合のほうがプラズマは発生しやすかった。また、この放電部に流速 2m/s ~ 20m/s で気流を流した実験を行ったが放電部のプラズマ形状や放電電圧に特に大きな変化は見られなかった。

#### 小型風洞の開発

放電部に気流を重畳する実験を行うため新たに小型風洞を製作した。小型風洞は、市販の同軸送風機に整流板を取り付けた形状となっており、吹き出し口に放電部を設置する。この製作した小型風洞を熱線式風速計で吹き出し口付近の空間速度分布を測定した結果を図 2 に示す。

その結果、最大風速 18m/s 以下で風洞中心の 10cm 程度でほぼ均一の流速分布を持つ小型風洞を実現することができた。

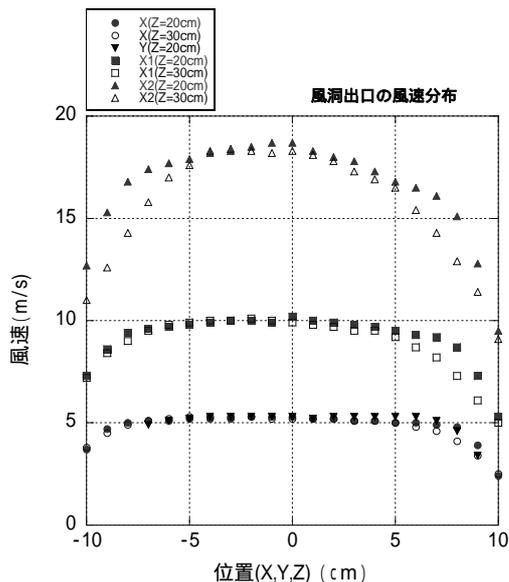


図 2 小型風洞の径方向流速分布

スモークワイヤー法による放電部まわりの気流変化観測

小型風洞の吹き出し口にニクロム線を設

置し、その線に流動パラフィンを塗布しニクロム線を加熱するとパラフィンが気化し流線に沿って流れる。これにより流れを可視化することができる。このスモークワイヤー法により、放電部周りの気流の変化を観測した。ただし、この方法は煙を用いているため低速気流でしか煙の軌跡が明確に現れない。その実験の一例を図 3 に示す。電極として図 1 (b)を用いて、流速 2m/s 下で放電電圧 16kV で実験を行った。この結果、プラズマがある、なしで大きな変化は見られなかったがプラズマがある場合は、煙が放電側に若干引きつけられている挙動も見えたが明確なことまではわからなかった。

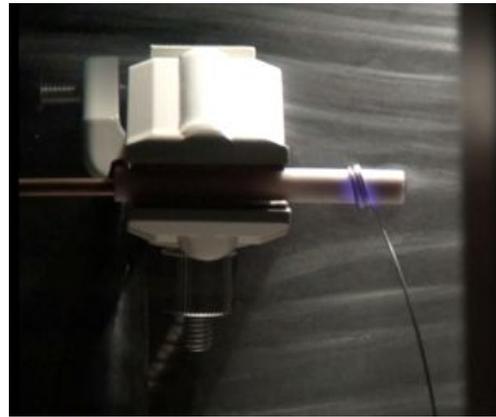


図 3 放電時の流線の様子

#### 空力抵抗測定器の開発

空気抵抗を測定するために、図 4 のような微小変位計を使用し、放電部が気流によって受ける抵抗力を測定する装置を製作した。放電部固定部に先に製作したプラズマ源の電極を設置する。空気抵抗を受けたプラズマ源は、支点を中心に回転し、その変位量を拡大し微小変位計で測定する。この測定器の性能を評価するために放電固定部に荷重をかけ較正実験を行った。その測定結果が図 5 である。

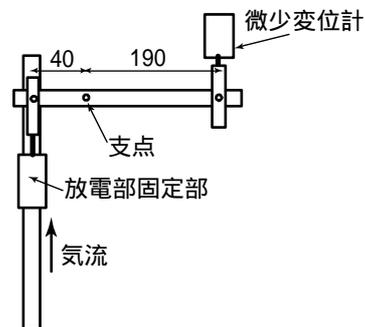


図 4 微小変位計の概要図（上から見た図）

荷重と表示電圧はほぼ比例関係にある。この装置の場合、放電部の空気抵抗は、最小で 25mN 程度は測定できるが、支点からの腕の長

さを調整することにより、より微少な力の測定は可能となると考えられる。しかし、この製作した装置では取付け部などの問題により再現性が良くないので改良の必要がある。とりあえず、この装置に図1(b)のプラズマ源を固定し、実験を試みたがプラズマがある、なしの変位量の明確な違いはわからなかった。

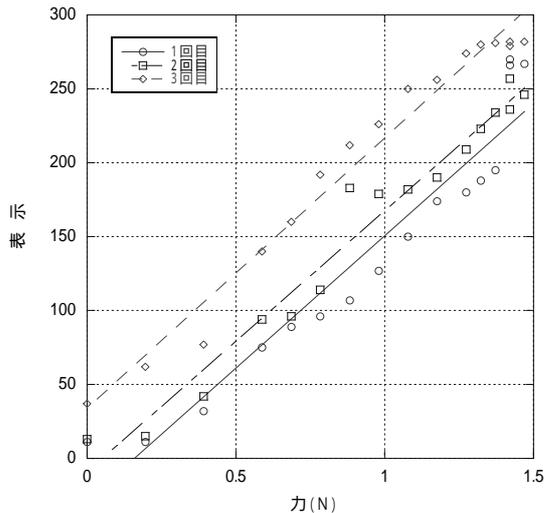


図5 較正曲線

## (2) 静電プローブ法による大気圧プラズマ測定

大気圧プラズマ中のプラズマ特性を調べる計測法として分光法や静電プローブ法などが挙げられる。静電プローブ法は大気圧下での使用・評価が十分になされている訳ではないので使用には問題があるが、相対的なプラズマ特性を比較することは可能であると考えられる。そこでここでは、高電圧を印加した電極を用いた実験ではなく、比較的实验が容易にできる火炎中の弱電離プラズマを用いることでプローブ法の測定を試みた。市販のプロパンガスバーナーを用い、このガス噴出ノズル金属を基準電極とし、ステンレス線(外径 0.5mm)を火炎中に挿入しバイアス電源により電流-電圧特性を測定した。その結果を図6に示す。

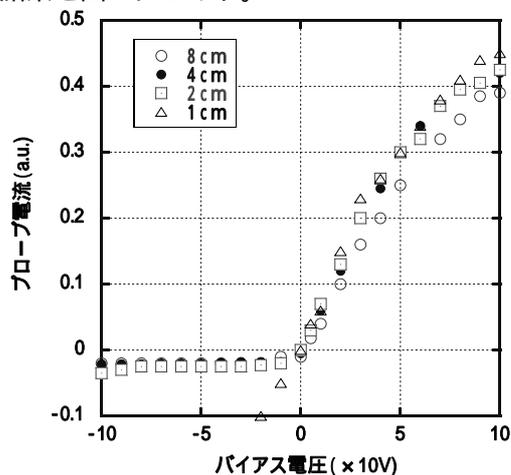


図6 電圧-電流特性

低気圧プラズマ放電と同様なプローブ特性が得られており、火炎中に弱電離プラズマの存在を示唆していることが分かった。また、火炎の位置によりイオン飽和電流の違いが見られることから火炎中のプラズマ密度の空間分布があることも分かった。

## (3) プラズマ源にマイクロ波を重畳する実験装置の整備

マイクロ波重畳実験を行うために、金属円筒容器(内径 0.7m、長さ 0.6m)内にマイクロ波発振器(2.45GHz、~1.5kW)から円形導波管を通して入射する。これを図7に示す。金属容器は、マイクロ波を外部に漏らさない遮蔽と金属容器内へマイクロ波を閉じ込めプラズマにマイクロ波を照射し、プラズマ領域を拡大する役割をもつ。プラズマ源は、市販の点火プラグを金属プローブの先端に取付け、マイクロ波入射の軸方向に掃引できるようにした。

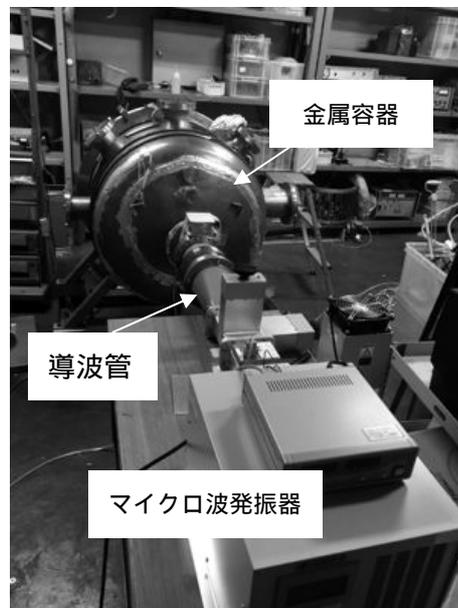


図7 マイクロ波重畳実験装置

図8は、市販の点火プラグにネオントランスで火花放電を起こしマイクロ波を重畳した様子である。

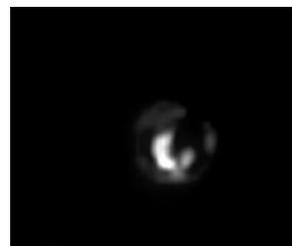


図8 マイクロ波重畳時の放電部

マイクロ波の重畳によりプラズマ領域の多少の拡大は見られたもののマイクロ波出力を大きくすると金属容器内部に導入した給電線などで放電を起こしてしまい低出力の

みでの観測しかできなかった。また、マイクロ波発振器はトランス方式を使用しているため時間的変動がある。このため DC アーク放電でさらにプラズマ密度を増加し、定常プラズマを用いようとしたが、本実験で用いた電源は最小電流が 20A にしか制御できないため電極が溶融してしまい実験することができなかった。これらの問題から期待したプラズマ領域の拡大には至らなかった。

以上が、本研究期間に実施した内容である。得られた成果は、まだ装置の未完成、実験内容の未説明が多くみられ国内外の学会発表等までには至らなかった。しかし、研究を進めていく中でいろいろな問題点や課題が明らかになり、それらを今後、修正改善し実験を進めていくことになった。

#### 5. 主な発表論文等

なし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

服部 邦彦 (Hattori Kunihiro)

日本工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90261578

##### (2) 研究分担者

佐藤 杉弥 (Sato Sugiya)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：00286022

##### (3) 研究分担者

塚林 功 (Tsukabayashi Isao)

日本工業大学・工学部・非常勤講師

研究者番号：30049720