

機関番号：11301

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360378

研究課題名 (和文) 非平衡プラズマを用いた超音速流における着火・燃焼促進

研究課題名 (英文) Ignition and Combustion Enhancement by non-equilibrium plasma in supersonic flow

研究代表者

滝田 謙一 (TAKITA KENICHI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80282101

研究成果の概要 (和文)：超音速流中において、誘電体バリア放電による非平衡プラズマの生成に成功し、その分光計測により着火・燃焼促進効果を有する励起窒素分子や酸素ラジカルが存在することを示した。さらに非平衡プラズマの生成に及ぼす印加電圧や印加周波数の影響を明らかにし、プラズマ生成に要する電力量の算出を行った。また、理論的研究により、高効率なラジカル生成を達成する高電圧印加法を明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：The generation method of non-equilibrium plasma by dielectric barrier discharge (DBD) in a supersonic flow was established. Excited nitrogen molecules and oxygen radicals, which were suitable for ignition and combustion enhancement, were detected by a spectroscopic measurement. The effects of applied voltage and frequency in discharge on the generation of non-equilibrium plasma were clarified and the electric energy for generation of the plasma was estimated. Moreover, efficient discharge conditions for radical generation were theoretically supposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2009 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：推進・エンジン、超音速燃焼、着火、プラズマ

1. 研究開始当初の背景

将来の宇宙輸送システムのエンジンとして、スクラムジェットの開発が米国をはじめ世界各国で進められている。エンジン開発における最大のキーテクノロジーは超音速流中での確実な着火・保炎技術であり、様々な着火、混合促進技術が研究されている。その中でプラズマを用いた着火・燃焼促進技術は、そのような超音速流における着火・燃焼促進技術の有力な手法と考えられ、近年、盛んに

研究されている。特に非平衡 (低温) プラズマによる着火・燃焼促進技術に強い関心が寄せられているが、超音速流中での着火・燃焼促進に適しているかは不明である。非平衡プラズマは平衡プラズマに比べて、ラジカル生成に対するエネルギー効率が非常に高い、大体積の着火領域を形成できる、流路や電極の損耗が小さい等の利点があるため、スクラムジェットに適用できれば極めて有効な着火・燃焼促進技術となりうる。

2. 研究の目的

非平衡プラズマを用いた着火・燃焼促進技術の新規開発を目的とする。プラズマによる反応促進機構を明らかにし、電子温度等のプラズマ特性を導入した燃焼解析手法により着火促進効果を見積もる。具体的な開発技術としてスクラムジェットエンジンの強制点火器に焦点を絞り、超音速流中での非平衡プラズマの生成手法の確立や非平衡プラズマによる着火促進デバイスの開発を目指す。

3. 研究の方法

(1) 超音速流における非平衡プラズマの生成法の確立

研究代表者の所属機関に既設の空気吸込み式超音速風洞にテストセクションを設置して、超音速流中での非平衡プラズマの生成を試みた。非平衡プラズマの生成には誘電体バリア放電(Dielectric Barrier Discharge: DBD)を利用した。図1にテストセクション概略図、図2にテストセクションに挿入した放電部の直接写真を示す。放電セクションには絶縁破壊強度が大きく耐熱温度が高いことから放電実験や燃焼実験に適しているアルミナを使用した。純アルミニウム電極をステップ状に配置し、その背後で放電を発生させた。電極間隔は3mmとしている。電源には最大で±10kV、±10mAの電圧、電流を出力できる高圧電源(HVA4321, エヌエフ回路設計ブロック製)を用いた。

放電時の電流、電圧波形の分析、生成した非平衡プラズマの直接写真、分光計測、テストセクション壁圧の測定、流れ場のシュリーレン画像の撮影等を実施し、プラズマ特性を調べた。

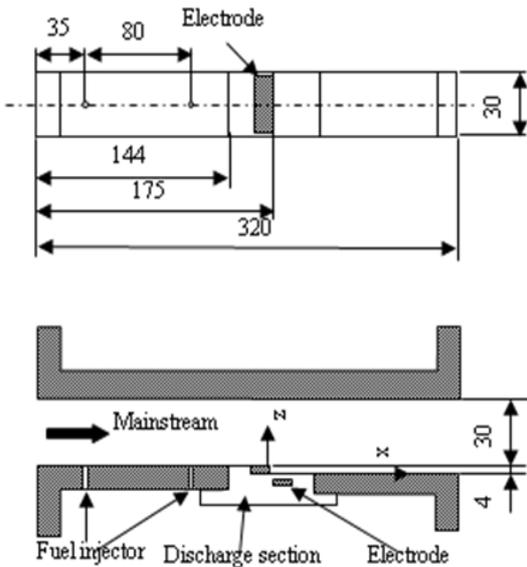


図1 テストセクション概略図



図2 放電部直接写真

(2) 非平衡プラズマによる着火促進過程の理論解析

① 非平衡プラズマを構成する化学種による着火促進効果の解析

非平衡プラズマに成分として含まれる活性種として代表的なオゾン (O_3) や NO_x (NO , NO_2) の存在が可燃混合気の着火遅れ時間に及ぼす影響を CHEMKIN パッケージの SENKIN コードにより調べた。

② 非平衡プラズマによる着火過程のシミュレーション

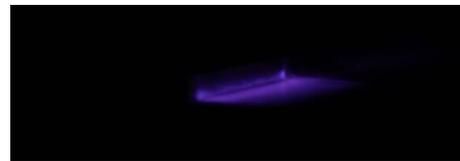
高電圧印加によるラジカル、イオンの生成過程 (10ns~100ns) と印加停止後の中性ラジカル反応による着火過程 (10 μ s~1ms) とに分離して解析を行うことにより、非平衡プラズマの発生から着火による火炎の形成に至るまでのシミュレーションを行った。高電圧印加時のラジカル生成は主に電子衝突反応によるものであり、それらの反応速度は印加する電場の強さや混合気の組成からボルツマン方程式を解いて求めた平均電子温度から算出する。高電圧印加後の着火過程は通常の燃焼における燃料の着火反応と同様に中性ラジカルの連鎖反応であり、SENKIN コードを用いて解析した。

4. 研究成果

(1) 超音速流中に生成された非平衡プラズマの特性

① 放電の様子

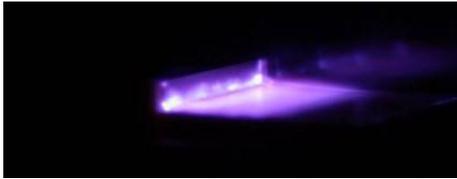
マッハ数 (M) 2.5 の超音速流中に生成した DBD プラズマの直接写真を図3に示す。電圧印加周波数 (f) は 2kHz で、印加電圧振幅 (V_{pp}) を変化させた。



(a) $V_{pp}=3kV$



(b) $V_{pp}=4kV$



(c) $V_{pp}=5\text{kV}$

図3 超音速流中に生成した DBD プラズマの直接写真 ($M=2.5$, $f=2\text{kHz}$)

印加電圧振幅が大きいほど発光が強く、放電領域が広がっているのがわかる。フィラメント状の放電は観察されず、ほぼ一様な放電状態である。

②印加電圧振幅、印加周波数への依存性

図4にマッハ数2.5の主流中に放電を発生させた場合の放電電力の印加電圧振幅依存性を異なる印加周波数に対して示す。放電電力は計測した電圧値、電流値より算出した。印加電圧振幅と印加周波数が増大するにつれて放電電力が大きくなる。放電電力の最大値は高々6W程度であり、熱(平衡)プラズマの代表であるプラズマジェット生成に有する最低投入電力(約1.5kW)に比べてかなり小さい。プラズマの生成には非平衡プラズマのほうが平衡プラズマよりエネルギー効率が高いことが示された。

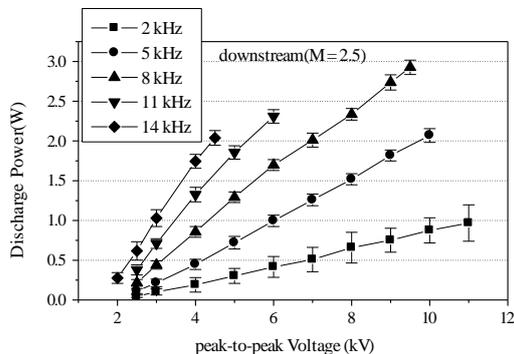


図4 放電電力の印加電圧振幅、印加周波数への依存性

また、非平衡プラズマが発生する最低印加電圧は静止大気圧下では10kV、 $M=1.0$ では8.0kV、 $M=2.0$ では4.0kV、 $M=2.5$ では2.0kVであった。主流のマッハ数が低いほど、つまりは主流静圧が低いほど放電が起こりやすい結果となった。

③非平衡プラズマの分光計測

分光計測により非平衡プラズマの発光スペクトルを分析した。図5には主流マッハ数2.0、印加電圧振幅6kV、印加周波数5kHzの場合のDBDプラズマの分光結果を示す。

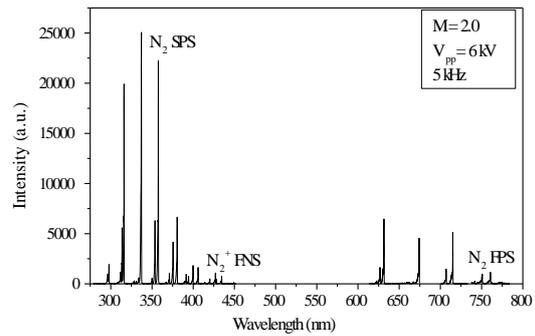


図5 DBDプラズマの発光スペクトル分布 ($M=2.0$, $V_{pp}=6.0\text{kV}$, $f=5\text{kHz}$)

窒素分子の第2正帯からの強い発光が検出され、さらに窒素分子イオンや窒素分子の第1正帯からの発光が捉えられている。0ラジカルからの発光(777nm)も極めて弱かったがわずかに検出された。

④放電が超音速流れ場に与える影響

放電を発生させた場合と発生させない場合とで壁圧分布を比較したが、放電の有無により壁圧の変化は検出されなかった。シュリーレン写真で撮影した衝撃波や膨張波の構造も放電に伴う変化はなかった。DBDでは発熱による温度及び密度変化がほとんどないためである。

(2)非平衡プラズマによる着火実験

DBDにより生成した非平衡プラズマに燃料流を衝突させて着火が起こるかを調べた。主流静温が低い超音速流中での実験に先立ち、主流静温が常温(約290K)の亜音速流中にて着火実験を試みたが、燃料種によらず、最大印加電圧振幅および最大印加周波数の条件でも着火に至らなかった。この理由は、非平衡プラズマ中において発生したラジカル等の反応を促進する活性粒子の数密度が小さかったか、あるいはそれらが生成されていても主流静温が低すぎるため着火に至らなかったためと考える。主流静温が常温よりも低くなる超音速流中ではさらに着火は困難と予想され、主流条件が着火に厳しい条件下では非平衡プラズマと何らかの熱源を組み合わせたとような着火促進法の開発が必要であることがわかった。

(3)プラズマ成分による着火促進効果

非平衡プラズマ中に存在する代表的な化学種であるオゾン(O_3)について、その着火促進効果を調べた。図6は水素/空気の量論混合気の着火遅れ時間に及ぼす少量のオゾン添加効果を調べたものである。雰囲気圧力は0.1MPaで、比較のためHラジカルを添加した場合の結果も示す。

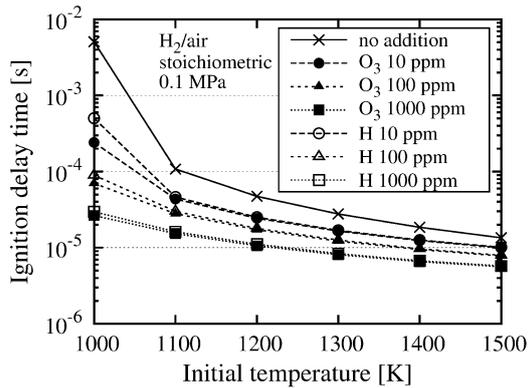
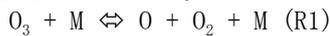


図 6 水素／空気混合気の着火遅れ時間に及ぼすオゾンの添加効果

図から、オゾンの少量の添加により着火遅れ時間が大幅に短縮されるのがわかる。効果の度合いはHラジカルとほぼ同じである。オゾンの分解によりOラジカルが生成(R1反応)され、そのOラジカルを介した着火促進効果によるものである。



非平衡プラズマの成分として代表的なNO_x(NO, NO₂)についても着火促進効果を調べた。計算結果によれば、水素、炭化水素系燃料いずれにおいてもNO_xの少量の添加により着火遅れ時間が短縮される条件が存在することがわかった。特に、低温、高压雰囲気においてNO_xの着火促進効果が大きいことが明らかになった。

(4) 非平衡プラズマによる着火促進効果に及ぼすパルス周波数の影響

非平衡プラズマを用いた着火促進においては、繰り返しパルスとして高電圧を印加するケースが多い。投入エネルギーが同じ場合、高電圧を低周波数で印加する場合と電圧値は小さくし周波数を大きくする場合とではどちらが効率的であるかは興味深い。本研究における着火解析により、パルス周波数の影響を調べた。

解析例として、メタン／空気の量論混合気に繰り返し高電圧パルスを印加して着火に至る過程を解析した。混合気初期温度を1200K、雰囲気圧力は0.1MPa、換算電界を120Tdとし、着火時間の定義は初期温度から400K上昇した時点とした。高電圧を印加しない場合の着火遅れ時間は45.5msであった。

図7は高電圧印加時間20ns、印加周波数20kHzの場合のO、OHラジカルのモル分率の時間履歴を示す。ラジカルの増加と共に混合気温度も上昇し、やがて急激な温度上昇を伴う着火が生じる。図7の条件における着火遅れ時間は0.764msであった。ラジカル濃度は高電圧印加により急激に増加するものの、高

電圧印加を停止すると急激に濃度が減少しているのがわかる。最初の5パルス程度までのラジカルの増加率が極めて大きく、それ以降は印加の有無により増減を繰り返しながら、平均のラジカルモル分率が緩やかに上昇している。図8は図7の条件に対して印加時間を2倍(40ns)、パルス周波数を半分(10kHz)にした場合のO、OHラジカルのモル分率の時間履歴である。図7に比べて、高電圧印加1回あたりでのラジカル濃度の増加率ははるかに大きいのがわかる。着火遅れ時間も0.456msであり、短縮される結果となった。

表1に着火遅れ時間と高電圧印加時間、印加周波数の関係の計算結果を示す。着火遅れ時間を短縮する度合いは1回の印加時間が大きく、ラジカルの生成つまりは燃料のメタンや酸素、窒素の分解が進行するほど大きいことが明らかとなった。

総印加時間あるいは総投入エネルギーが同じであるなら、1パルスあたりの印加時間をできる限り大きくしラジカルの生成量を増大させたほうが着火促進効果が大きい。しかし、印加電圧の増加はアーク放電への移行を起こし易くするため、個々の燃焼場に対して最適な印加電圧、印加周波数が存在すると考えられる。

表 1 高電圧印加時間(t_{dis})、印加周波数(f)と着火遅れ時間(τ_{ign})の関係

t _{dis}	0ns	10ns	20ns	40ns
f		40kHz	20kHz	10kHz
τ _{ign} [s]	4.55e ⁻²	2.71e ⁻³	7.64e ⁻⁴	4.56e ⁻⁴

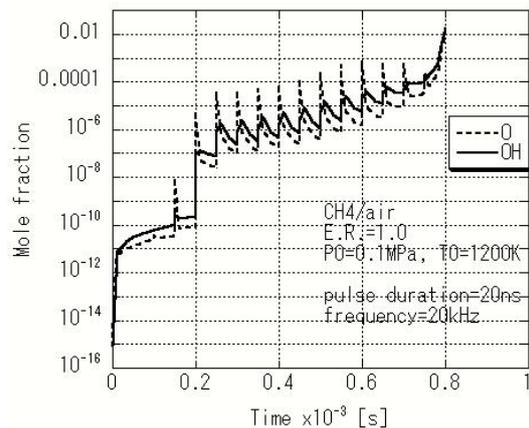


図 7 繰り返し高電圧パルスにより生成したO、OHラジカルのモル分率の時間履歴 (高電圧印加時間20ns、印加周波数20kHz)

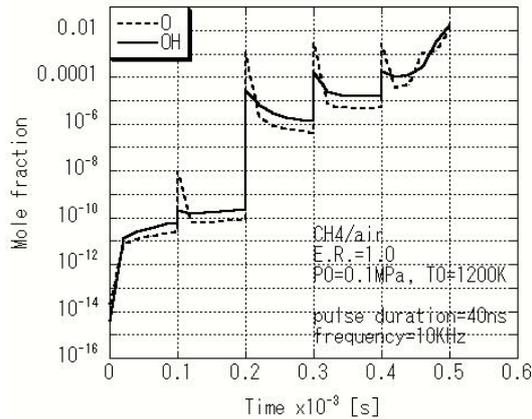


図 8 繰り返し高電圧パルスにより生成した O, OH ラジカルのもル分率の時間履歴 (高電圧印加時間 40ns、印加周波数 10kHz)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. K.Takita, K.Shishido, K.Kurumada, Ignition in a Supersonic Flow by a Plasma Jet of Mixed Feedstock Including CH₄, Proceedings of the Combustion Institute, 査読有, Vol.33, 2011, pp.2383-2389.

[学会発表] (計 10 件)

1. 松原慶典, 滝田謙一, プラズマ化したメタン燃料の着火特性の数値解析, 第 48 回燃焼シンポジウム, 2010 年 12 月 1 日, 福岡

2. 岡崎慈, 松原慶典, 山本貴正, 滝田謙一, 河内俊憲, 超音速流における誘電体バリア放電に及ぼす主流マッハ数の影響, 第 48 回燃焼シンポジウム, 2010 年 12 月 1 日, 福岡

3. 滝田謙一, 松原慶典, プラズマ着火に及ぼすパルス周波数と印加電圧の影響, 第 48 回燃焼シンポジウム, 2010 年 12 月 1 日, 福岡

4. 滝田謙一, プラズマを用いた燃焼促進技術, 第 71 期応用物理学会, 2010 年 9 月 16 日, 長崎

5. 滝田謙一, 熱プラズマによる高速流中での着火・燃焼促進, 第 1 回プラズマ支援燃焼研究会, 2010 年 3 月 15 日, 大阪

6. 松原慶典, 山本貴正, 岡崎慈, 河内俊憲, 滝田謙一, 誘電体バリア放電を用いた高速流中での着火促進技術の開発, 日本航空宇宙学会北部支部 2010 年講演会, 2010 年 3 月 10

日, 仙台

7. Takamasa Yamamoto, Yoshinori Matsubara, Kenichi Takita, Toshinori Kouchi, Development of Ignition Enhancement by Using Non-equilibrium Plasma in High Speed Flow, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2010, 2010 年 3 月 4 日, 宮崎

8. 山本貴正, 松原慶典, 滝田謙一, 河内俊憲, 非平衡プラズマを用いた高速流中での着火促進法の開発, 第 47 回燃焼シンポジウム, 2009 年 12 月 4 日, 札幌

9. 滝田謙一, Johannes H. Spitzbart, 松原慶典, 升谷五郎, 少量の NO_x の存在が高压における着火に及ぼす影響, 日本機械学会東北支部第 45 期秋季講演会, 2009 年 9 月 26 日, 福島

10. 滝田謙一, 松原慶典, 森永啓大, 少量の NO_x の存在が着火・消炎に及ぼす影響, 日本航空宇宙学会北部支部 2009 年度講演会, 2009 年 3 月 10 日, 仙台

[その他]

ホームページ

<http://www.scramjet.mech.tohoku.ac.jp/1ab/japanese.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

滝田 謙一 (TAKITA KENICHI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：80282101

(2) 研究分担者

升谷 五郎 (MASUYA GORO)

東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20271869

河内 俊憲 (KOUCHI TOSHINORI)

東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：40415922

(3) 研究連携者

()

研究者番号：