

氏 名	こばやし かん 小 林 完
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成11年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)航空宇宙工学専攻
学位論文題目	超音速流における着火促進に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 新岡 嵩
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 新岡 嵩 東北大学教授 齋藤 武雄 東北大学教授 升谷 五郎

論 文 内 容 要 旨

第1章 序論

次世代超音速機の推進システムとして、スクラムジェットエンジンが有望視されている。スクラムジェットエンジンの特徴は、エンジン内流速が超音速となるため、着火・保炎が極めて困難となることである。そこで、安定な着火・保炎を実現するためにプラズマトーチが着目され、これまで研究が行われてきた。

しかしながら、プラズマトーチによる着火促進メカニズムには不明な点が多い。例えば、プラズマトーチはイオンやラジカル等の活性化学種を供給するとともに、その高温ガスが熱源として作用するとも考えられる。これらの要素のなかで、何が着火促進を支配しているのかよくわかっていない。従って、トーチの形態や作動ガスなど、最適設計の指針が立たないのが現状である。

そこで本研究は、数値解析や漸近解析、および実験によってトーチによる着火促進メカニズムについて詳細に調べることを目的とする。

第2章 プラズマトーチおよびイオン

本章では、プラズマジェットに含まれるイオンが着火促進に寄与するのかどうかを数値解析によって調べた。イオンが着火促進に寄与するかどうかは、イオンが再結合することによって生成されるラジカルの量が、反応系内の総括ラジカル量と比較して同程度以上であるかどうかを調べればわかる。そこで1次元反応コードを用い、静止している均一場における水素/酸素予混合気の着火を扱った。

まず、初期にイオンが平衡濃度で存在する場合の水素/酸素予混合気(理論混合比)の着火解析を行い、イオン再結合によるラジカル生成速度と系内の総括ラジカル生成速度を比較した。その結果、イオン再結合反応によるラジカル生成速度は総括ラジカル生成速度と比較して3桁以上小さく、無視できることがわかった。更に、初期にイオンが存在しない場合の計算も行ったところ、イオンの有無にかかわらず、総括ラジカル生成速度は変化しないことがわかった。従って、イオンは着火に寄与しないと結論できる。このことは、プラズマトーチがイオン源としてではなく、ラジカル源もしくは熱源として作用していることを示している。

第3章 プラズマトーチに関する漸近解析

トーチがラジカル源もしくは熱源として作用していることから、その着火促進機構を調べるにはプラズマジェットにおける温度および解離度を評価しなければならない。そのためにはプラズマジェット内の温度分布を知る必要があるが、プラズマジェットはその特徴として半径方向に温度分布を有している。ラジカルを生成する解離反応はその強い温度依存性のため、高温部で優先的に進行する。従って温度分布を考慮することにより、均一温度を仮定する場合よりも解離度が増大する可能性がある。しかしその一方で、やはり解離反応の強い温度依存性のためにラジカル発生がプラズマジェット中心部に局限され、温度分布を考慮する場合の解離度が均一温度の場合よりも減少するかも知れない。そこで、本章ではプラズマトーチに関するエネルギー方程式に対して漸近解析を適用し、プラズマジェット内の半径方向温度分布を調べた。

その結果、電離特性温度とプラズマ最高温度の比で定義する電離ゼルドビッチ数をパラメータとした漸近解が求まり、プラズマジェットにおける半径方向の無次元温度（温度／プラズマ最高温度）分布を解析的に表現することができた。ここで、無次元温度から実際の温度を求めるのに必要となるプラズマ最高温度はエネルギー方程式の断面積分から得られ、トーチへの投入エネルギーで表せる。アルゴン、窒素、酸素の各作動ガスについてプラズマ最高温度と投入エネルギーの関係を調べた結果、投入エネルギーを固定する場合にはアルゴンの最高温度が最も高く、ついで窒素、酸素の順であった。酸素プラズマの最高温度は、例えば投入エネルギーが 4 kW の場合には概ね 10000 K となることがわかった。こうして求めた無次元温度とプラズマ最高温度から、実際の温度分布が得られた。この温度分布からさらに電流密度の半径方向分布を求めた結果、電流密度の高い領域はプラズマジェット中心に局限されることがわかった。このことは、プラズマトーチに投入したエネルギーの大部分がプラズマ中心部に局限されることを示している。

第4章 プラズマトーチにおけるラジカルおよびエンタルピー分布

プラズマジェット内の局所温度が求めたことにより、局所解離度を求めることができる。そこで、本章ではプラズマジェット内の温度および解離度の平均値を定義した。そして、それらを均一温度の場合と比較することにより、平均温度および平均解離度が温度分布を有することによってどのような影響を受けるのかを調べた。更に、求めた平均温度および平均解離度から着火時間を評価し、プラズマトーチおよび水素／酸素燃焼ガスを噴射するマイクロロケットトーチの着火促進効果を予測した。

温度および解離度の平均値について、ここでは質量流束の重み付き積分値である cup mixing 値を用いた。その結果、平均温度と平均解離度の関係が求まり、平均温度に寄与する熱的エネルギーと平均解離度に寄与する化学的エネルギーを求めることができた。そこで両者の和をトーチへの投入エネルギーと定義し、投入エネルギーと平均温度、および投入エネルギーと平均解離度の関係を調べた結果、投入エネルギーを固定する場合には温度分布を有することによって平均解離度は上昇し、平均温度は低下することがわかった。

こうしてプラズマジェットにおける平均温度および平均解離度がわかると、ステップ下流の再循環領域における主流とトーチ噴射ガスの混合気温度およびラジカル濃度を求めることができる。ここで、三谷らが用いた水素／酸素反応におけるラジカル濃度の時間変化式を時間について積分すると、着火時間が温度およびラジカル濃度で表せることから、トーチ使用時の着火時間を評価することができる。今、理論混合比におけ

るマイクロロケットトーチへの投入エネルギーが 120 kJ/mol であることから、プラズマトーチについても 120 kJ/mol の投入エネルギーを仮定する。このとき各々のトーチを用いる場合の混合気温度およびラジカル濃度から着火時間を見積もり、トーチを用いない場合の着火時間と比較すると、それぞれのトーチの着火促進（着火時間短縮）効果が同程度であった。このことから、プラズマトーチとマイクロロケットトーチは同程度の着火促進効果を有すると予測できる。

第5章 マイクロロケットトーチによる着火促進実験

第4章で考慮したマイクロロケットトーチは、微妙な電極位置設定を要するプラズマトーチと比べて明らかに単純な構造となる。従って、第4章で得られた予測が正しいならば、従来のプラズマトーチよりもマイクロロケットトーチを用いる方がよい。そこで本章では、前章で得られた予測を確認するために科学技術庁航空宇宙技術研究所 角田宇宙推進技術研究センターにおいてマイクロロケットトーチによる着火促進実験を行い、同研究所で以前行われたプラズマトーチによる着火促進実験の結果と比較した。更に、前章で用いた着火時間評価法により、着火促進に対する温度上昇の効果とラジカル濃度上昇の効果と比較した。

実験に用いた風洞はブローダウン方式であり、水素希薄燃焼によって主流全温を800 Kから2500 Kまで変化させることのできる燃焼加熱器を備えている。主流マッハ数は 2.5、主流全圧は 1.0 MPa で固定した。燃焼器はプラズマトーチによる着火促進実験に用いられたものを用い、プラズマトーチ取付孔にマイクロロケットトーチを取り付けた。マイクロロケットトーチは銅製無冷却とした。直径10 mmの燃焼室に水素/酸素を理論混合比で供給して自動車用点火プラグで着火・燃焼させ、その燃焼ガスを直径1.4 mmの噴射孔から噴射する。

着火・不着火は、ある一定時間における燃焼器の壁面温度上昇によって判定した。主流におけるバルク当量比を固定して主流全温を変化させ、着火限界（最低）全温を求めた結果、トーチを用いることによって自発着火限界よりも着火限界温度が低下した。そして、以前のプラズマトーチと今回のマイクロロケットトーチの着火促進効果が同程度であった。このことは第4章における予測通り、プラズマトーチとマイクロロケットトーチが同程度の着火促進効果を有することを示している。また、トーチへの投入エネルギーを変化させる場合の着火限界温度の変化を調べた。その結果、投入エネルギーの増加と共に着火限界温度が直線的に低下したことから、着火促進（着火限界温度低下）がトーチへの投入エネルギーに支配されていることがわかった。

さらに、着火促進に対する温度上昇の効果とラジカル濃度上昇の効果と比較するため、第4章と同様の方法によって着火時間を評価した。その結果、プラズマジェットにおいて温度分布を考慮する場合の方が、均一温度を仮定する場合よりも着火促進（着火時間短縮）効果が大きかった。また、温度分布を考慮する場合には着火促進がラジカル濃度上昇に支配されており、均一温度を仮定する場合には着火促進が温度上昇に支配されていた。以上のことは、着火促進に対するラジカル濃度上昇の効果が温度上昇の効果よりも大きいことを示している。ただし、作動ガスとして酸素などの解離し易いものを用いる場合には、均一温度の場合でもある程度の解離が起こるため、温度分布の有無による着火促進効果の差は小さくなる。

第6章 結論

本論文は、超音速流における着火促進について漸近解析や数値解析、および実験からその機構を探ることを目的としたものである。結論は、以下のようにまとめられる。

- (1) イオンは着火に寄与しない。従って、プラズマトーチはイオン源としてではなく、ラジカル源もしくは熱源として作用している。
- (2) 漸近解析により、プラズマジェット内の半径方向温度分布を求めることができた。その結果、プラズマジェット最高温度が10000 K程度であること、そして投入したエネルギーの大部分がプラズマ中心部に局限されることがわかった。
- (3) トーチへの投入エネルギーを固定する場合、温度分布を考慮することによって平均解離度は増加し、平均温度は低下する。こうして求めた温度およびラジカル量から着火時間を評価したところ、プラズマトーチとマイクロロケットトーチが同程度の着火促進効果を有することが予測できた。
- (4) 実際に実験によってプラズマトーチとマイクロロケットトーチの効果を比較したところ、両者は同程度の着火促進効果を示した。また、着火促進効果がトーチへの投入エネルギーに支配されることがわかった。
- (5) 着火促進に対する温度上昇の効果とラジカル濃度上昇の効果を着火時間の評価によって比較したところ、ラジカル濃度上昇の効果が温度上昇の効果よりも大きいことがわかった。

審査結果の要旨

次世代超音速機の推進システムとして、スクラムジェットエンジンが有望視されている。スクラムジェットエンジンにおいてはエンジン内流速を超音速とするため、安定な着火および保炎が困難となる。そこで、着火促進法の一つとしてプラズマトーチの利用が考えられているが、その詳細な着火促進機構については未だ不明な点が多い。本論文は、プラズマトーチによる着火促進に着目して解析ならびに実験からその機構を明らかにしたものであり、全編6章からなる。

第1章は序論である。

第2章は着火促進に対するイオンの効果に着目した数値解析である。プラズマジェットに含まれるイオン濃度が小さいため、イオン再結合によって生成されるラジカル量が総括ラジカル量より桁違いに少ないこと、すなわちイオンが着火促進に寄与しないことを明らかにしている。

第3章はイオン化エネルギーに着目した漸近解析法による解析である。トーチへの投入エネルギーと最高温度の関係を求めると共に、プラズマジェット特有の半径方向温度分布を解析的かつ定量的に評価し、イオン化エネルギーが大きいほど高温領域がプラズマ中心部に局限されることを明らかにしている。

第4章は着火時間に着目した解析である。トーチを用いる場合の混合気内温度およびラジカル濃度から着火時間を評価し、水素/酸素燃焼ガスを噴射するマイクロロケットトーチと従来のプラズマトーチが同程度の着火促進効果を有することを予測している。

第5章はマイクロロケットトーチによる着火促進実験である。実際にマイクロロケットトーチとプラズマトーチの着火促進効果を比較することにより、両者が同程度の着火促進効果を有することを示すと共に、その着火促進効果がトーチへの投入エネルギーに支配されることを明らかにしている。そして着火時間を解析的に評価することにより、着火促進に対するラジカル濃度上昇の効果が温度上昇の効果よりも大きいことを示している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、超音速流における着火促進に関して、トーチからの高温噴射ガスが温度分布を有することによる効果とその詳細な着火促進機構を実験およびイオン化エネルギー漸近解析を交えた解析によって初めて明らかにしたものであり、航空宇宙工学ならびに燃焼工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。