

氏名	みなと りょうじろう 湊 亮 二郎		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成14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	Numerical Study of Ignition and Combustion by Plasma Torch in Supersonic Airflow (超音速空気流におけるプラズマトーチによる着火及び燃焼の 数値解析的研究)		
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	東北大学助教授小林 秀昭	

論文内容要旨

第1章 序論

ロケットエンジンに代わる、次世代宇宙推進システムとしてスクラムジェットエンジンに注目が集まっているが、同エンジンの実現には超音速流での着火・保炎という難題が存在する。その解決手段の一つとしてプラズマトーチを用いて着火及び燃焼を促進させることが提案されているが、プラズマジェットと燃料流が干渉したときの火炎の構造や、プラズマを構成する活性化学種が燃焼反応に及ぼす影響など、プラズマトーチによる燃焼現象には、未知の現象が残されている。そのためプラズマトーチの最適設計に関する明確な指針に欠けており、スクラムジェットの実用化を困難なものにしている。そこで本論文では数値解析によって同現象を解析し、現象解明とプラズマトーチの最適設計の指針を求めることを目的とする。

第2章 数値解析法

本章では数値解析法について述べている。本研究ではプラズマトーチを扱っているため、本来はイオンの輸送方程式や熱非平衡性も考慮しなければならないが、スクラムジェットエンジンの点火器としてのプラズマトーチの温度は比較的低温であるため、電離度や熱非平衡性は極めて小さい。またイオンが着火に及ぼす影響も小さいので、イオンの輸送方程式は考慮せず熱平衡と仮定した。

以上の仮定に基づき、本研究での支配方程式は3次元対流項と粘性項の差分に、それぞれ Steger-Warming の Flux Vector Splitting Scheme と二次精度中心差分を適用して、時間積分に Yoon and Shuen による Lower-Upper Symmetric Gauss Seidel 法を用いた。乱流モデルには、Baldwin Lomax 代数モデルを用いた。酸素プラズマの解析では、窒素の反応は無視して良いので化学反応モデルは Stahl and Warnatz による9化学種33素反応水素-酸素反応モデルを使用した。また窒素及び空気プラズマの解析では、窒素も反応に関与するものとし13化学種57素反応水素-酸素-窒素反応モデルを使用した。この時の反応定数は Sanders et al. や GRI-Mech, Gnoffo 及び Jachimowski らの反応定数を用いた。

第3章 酸素プラズマによる超音速燃焼と酸素原子ラジカル

本章では酸素プラズマに焦点を当て、水素噴流をプラズマトーチの上流から噴射したときの燃焼流の解析を行っている。この時の解析モデルを図1に示されたものである。主流空気のマッハ数、全温及び全圧はそれぞれ2.5, 700~2000 K, 1.0 MPaである。プラズマトーチと水素噴流は共に音速噴射させ、プラズマトーチの全温と全圧はそれぞれ2500~3500

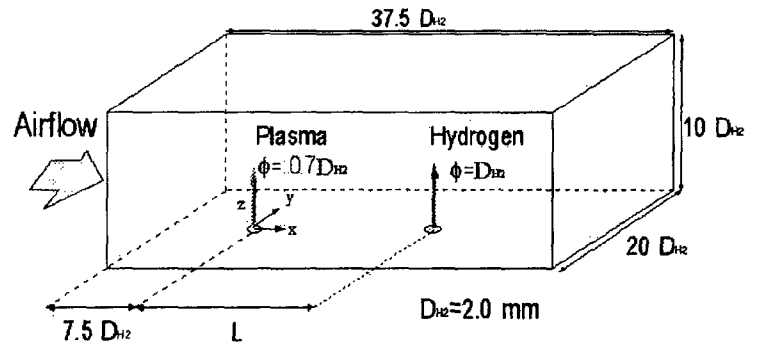


図1. 解析モデル

K, 0.98 MPaで水素噴流では、300 K, 0.5MPaである。そして両者の距離は30 mmである。

この条件下で燃焼流の構造を解析した結果、水素噴流の主流空気流への貫通距離は、噴射圧がプラズマトーチよりも小さいにもかかわらず、増大することが分かった。また水素噴流上流側に再循環領域が形成され、そこが着火源になっていることが判明した。

また出口境界における燃焼効率、主流空気全温 T_{air} が高いほどまたプラズマトーチ噴射全温 T_{PT} が高いほど大きくなるが、 T_{PT} が燃焼効率に及ぼす影響は T_{air} が低いほど大きく、 T_{air} が高いと T_{PT} による燃焼効率の差は小さくなっていった。

プラズマガスに含まれる酸素原子ラジカルの、燃焼反応に与える影響について、ラジカルを含んだ実在プラズマと、ラジカルのない非解離プラズマによる燃焼効率の比較を行った。両者のプラズマトーチによる燃焼効率の差は主流空気全温が高いときは小さいが、主流空気全温が低くなると、実在プラズマでは H_2O の生成は確認できたが、非解離プラズマでは燃焼効率はほとんど0であった。この理由は、これまでに行われてきた水素酸素予混合気ラジカルを添加したときの着火時間の測定結果から説明できる。それらの結果から、予混合気の初期温度が低いときの方がラジカル添加による着火時間の短縮幅は大きくなるということが分かっている。従って主流空気温度が低い時では、O原子ラジカルの影響が顕著に現れたものと考えられる。

第4章 水素噴流の噴射位置とプラズマトーチの噴射全圧の影響

第3章に引き続き本章でも酸素プラズマに焦点を当て、プラズマトーチに対する水素ジェットの相対位置の燃焼効率に与える影響について論じた。図2、3は水素噴流がそれぞれプラズマトーチ下流時、上流時に配置させたときの混合効率 (M.E) 燃焼効率 (C.E) で、横軸に水素噴流の、プラズマトーチからの無次元位置をとってある。図2、3は、それぞれ水素噴流もしくはプラズマトーチからの無次元位置が、15, 7.5, 0.0の位置の混合・燃焼効率を図示してある。図2において水素噴流がプラズマトーチの下流側に配置されたときには、両者の距離が小さくなるほど燃焼効率が大きくなる。特に水素噴流の無次元位置が5にまで近づくと燃焼効率は1.5倍から2倍のオーダーで上昇している。その一方混合効率にはこのような上昇は現れていない。水素噴流周りの流れ場を解析してみると、水素噴流の無次元位置が5になったとき水素噴流の上流側で再循環領域が著しく拡大していることから、この燃焼効率の増加は再循環領域の拡大による水素燃料の対流時間の増加によるものと考えられる。一方水素噴流がプラズマトーチの上流側に配置した時、プラズマトーチ噴射位置における燃焼効率は、水素噴流がプラズマトーチから離れるに従って増加していることが分かる。

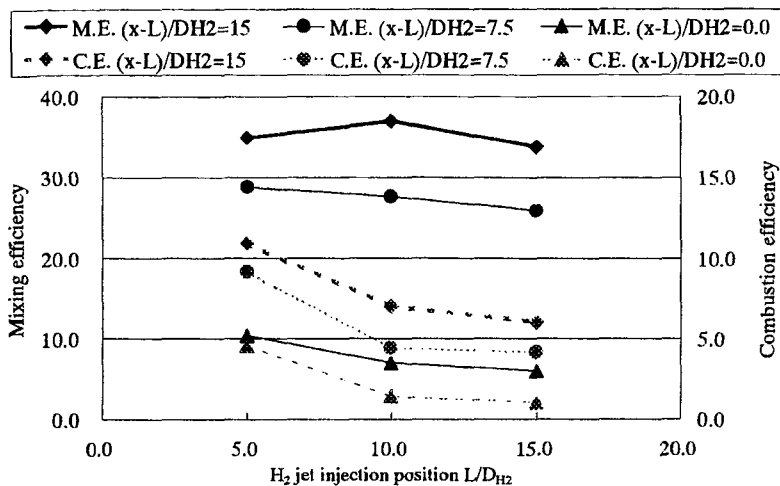


図2 水素噴流下流時の混合・燃焼効率

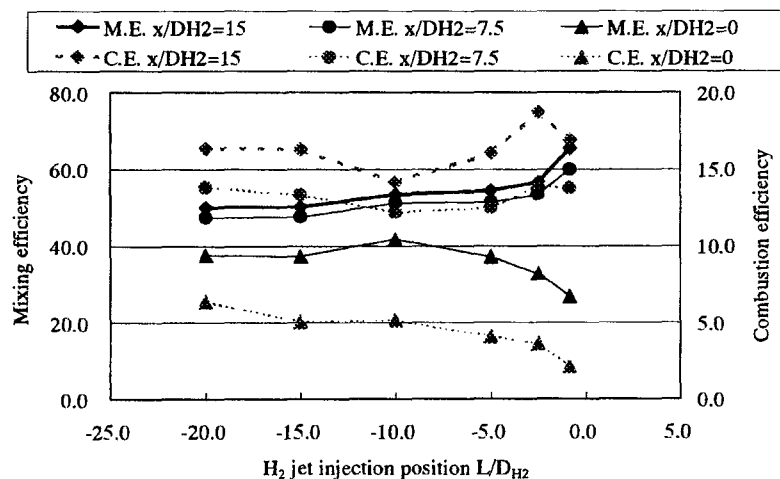


図3 水素噴流下流時の混合・燃焼効率

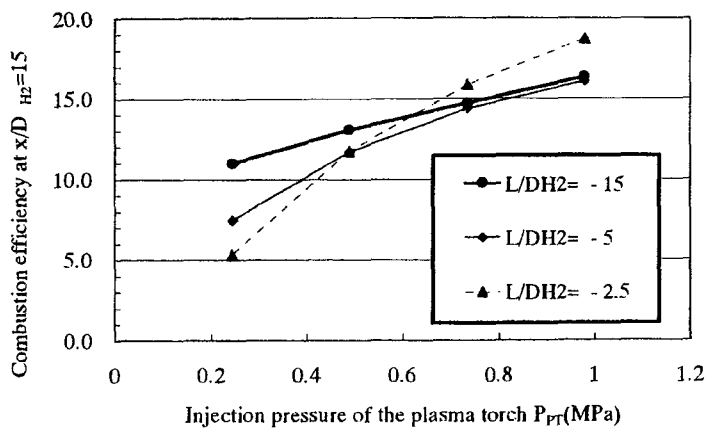


図4 プラズマトーチ噴射全圧の燃焼効率に及ぼす影響

これは燃料噴射後プラズマトーチに到達するまでに、水素と主流空気との混合が進行するため、混合効率も水素噴流がプラズマトーチから離れるに連れて増加していることが分かる。しかしながら、プラズマトーチからの無次元距離が15の位置における燃焼効率は、水素噴流の無次元位置が-2.5の時に急激に増大していることが分かる。一方、混合効率も上昇傾向にあることから、この燃焼効率の上昇はプラズマトーチの後流で混合が促進したためと考えられる。最後に、図4にプラズマトーチの噴射全圧が燃焼効率に与える影響を図示する。図4では横軸にプラズマトーチ噴射全圧 P_{PT} をとり、縦軸にプラズマトーチからの無次元位置が15の位置における燃焼効率を取っている。一般的に、水素噴流の噴射位置がプラズマトーチから離れるにつれて、燃焼効率が増加する傾向にある。しかしプラズマトーチの噴射全圧 P_{PT} が大きくなってくると、水素噴流の噴射位置がプラズマトーチに近い方が却って燃焼効率が增大する。この原因は水素ガスの分布から説明できる。即ち、 P_{PT} が大きいと主流空気に対するプラズマガスの貫通距離が増加し、それに伴い水素ガスの貫通距離もまた増大する。その結果混合が促進され燃焼効率が増加する。しかし、 P_{PT} が小さいと貫通距離の増大による混合促進の効果は小さく、燃焼効率は上昇しな

い。また、水素噴流の噴射位置がプラズマトーチから離れた場合では、 P_{PT} の大きさに関係なく水素ガスはプラズマトーチと干渉した後、左右に二分され壁面付近に偏在するようになる。

第5章 空気プラズマ及び窒素プラズマによる燃焼の解析

第5章では、窒素プラズマと空気プラズマの解析を行い、酸素プラズマの解析結果と比較した。窒素の反応も考慮した。その結果、第3章及び4章の酸素プラズマの解析では9化学種33素反応モデルであったが、窒素及び空気プラズマの解析では反応モデルを拡張し13化学種57素反応モデルとなった。

最初にプラズマトーチの噴射全圧を0.490MPa、噴射全温3000 K、水素噴流の無次元噴射位置 L/D_{H_2} を-2.5にした時の解析を行った。その結果、酸素プラズマでは十分保炎が可能であったのに対し、窒素プラズマでは保炎できず、空気プラズマではプラズマトーチ付近のみ火炎が存在した。そこで第3章及び4章の結果を基に、窒素及び空気プラズマによる保炎性を向上させるために、以下のような方策を検討した。

1. 水素噴流の噴射位置をプラズマトーチから離す。
2. プラズマトーチの噴射全圧を上げる。
3. プラズマトーチの噴射全温を上げる。

このうち、窒素プラズマに関しては方策1のみが有効だったのに対し、空気プラズマでは方策1、2が有効であった。方策3は窒素プラズマ、空気プラズマ共に有効でなかった。方策1が窒素プラズマ、空気プラズマの保炎性向上に共に有効だったのは、水素噴流の噴射位置がプラズマトーチから離れた方が、水素ガスはプラズマトーチの噴射位置でより混合が促進されるためと考えられる。方策2が空気プラズマのみが有効であったのは、方策2によって燃料の水素ガスと混合が促進されるが、プラズマガス中の酸素が高温の酸化剤として機能するためと考えられる。

第6章 結論

本章では、第3章から第5章までの解析結果についてまとめた。

論文審査結果の要旨

プラズマトーチを内燃機関の点火装置として用いることは、以前から提案されていたが近年、スクラムジェットエンジンのような超音速空気流における燃焼器の着火装置として有望視され、活発に研究が進められている。スクラムジェットエンジン用のプラズマトーチの最適設計には、燃焼流の構造やラジカルが燃焼反応に及ぼす影響などの情報が必要であるにもかかわらず、現象は十分に解明されていなかった。本論文はプラズマトーチによる超音速燃焼の3次元数値解析を行い、燃焼流の構造やラジカルの影響、更には水素燃料の噴射位置及びプラズマ作動気体の種類の影響等についてまとめたもので、全編6章からなる。

第1章は序論であり、研究の背景と目的について述べている。

第2章では、燃焼素反応を伴った3次元流れ場の数値解析法について詳述している。

第3章では、酸素プラズマに焦点を当て、水素噴流をプラズマトーチの後流側に配置させたときの燃焼流の解析を行っている。更に、主流空気全温やプラズマ噴射全温が燃焼効率に及ぼす影響を解析したほか、酸素原子ラジカルを含まない非解離プラズマと実在プラズマの燃焼効率の比較から、酸素プラズマ中に含まれる酸素原子ラジカルが水素-酸素反応に及ぼす影響について示している。これは着火及び燃焼性能に及ぼすプラズマの影響を明らかにした重要な知見である。

第4章では、第3章に引き続き酸素プラズマに焦点を当て、プラズマトーチに対する水素燃料噴射口の相対位置を変化させたときの混合・燃焼効率の変化を解析し、同時にプラズマトーチの噴射全圧を変化させて解析を行っている。従来ほとんど議論されなかった、プラズマガスと燃料が干渉した時の混合の燃焼に及ぼす影響について考察しており、プラズマトーチを導入したときの燃焼流3次元構造を示した有用な知見である。

第5章では、反応モデルを9化学種33素反応からなる水素-酸素反応系から、13化学種57素反応からなる水素-酸素-窒素反応系に拡張して、窒素プラズマと空気プラズマの解析を行っている。第4章の結果と比較しつつ、窒素及び空気プラズマの着火及び燃焼性能の向上について考察しており、プラズマトーチの設計上有益な情報を与えている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、超音速空気流におけるプラズマトーチによる着火・燃焼現象の数値解析を行い燃焼流の構造を明らかにすると共に、ラジカルが燃焼に及ぼす影響などを明らかにしており、航空宇宙工学及び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。