

博士論文（要約）

予冷ターボジェットエンジンのアフターバーナ
における水素燃焼場挙動の光学計測

喜多 翔ノ介

予冷ターボジェットエンジンは、マッハ5クラスの極超音速機の実現のため研究開発されているものであり、当該エンジンのアフターバーナにおいては、予冷による推力向上の効果を最大とするため、システム設計上巡航時において当量比2.2程度の燃料過濃燃焼が選択されている。実現に向けての課題として、試験用小型エンジンにおいて60%程度の低い燃焼効率しか実現できていないこと、高層大気中を飛行するため窒素酸化物（NO_x）の排出が厳しく制限されることが挙げられる。

このような観点から本論文ではまず、高エンタルピー風洞を用いた燃焼実験において燃料噴射角度をパラメータとし、燃焼効率測定及びNO_x排出量測定実験を行った。続いて水冷式の可視化燃焼器を作成、保炎形態を高速度カメラで撮影するとともに、NO_x生成を促す高温領域の有無を確かめるために内部の温度分布測定を行った。測定手法として、燃焼場に添加した炭化ケイ素微粒子からの放射を計測する粒子添加可視二色法を考案し、風洞実験へと適用するとともに、その信頼性を評価するための誤差評価を行った。

粒子添加可視二色法における分光放射輝度の測定に際しては、燃焼器内部の分光計測を事前に行い、燃焼器内に自然に存在するナトリウム及びカリウムのスペクトル線を避け、532nm及び656nmを使用することとした。粒子添加可視二色法の風洞実験への適用に当たり、事前に分光器を用いた干渉フィルタの透過率校正、黒体炉を用いたカメラの受光素子の変換効率校正、及び添加粒子の放射率校正を行った。添加粒子の放射率校正を行うに当たっては、安定した二次元火炎を維持することのできる、水素を燃料とする多孔質円筒バーナを作成し、熱電対による温度測定を元に各波長における放射率を計測した。測定点における添加粒子の濃度によって放射率は変化した。二波長の放射率の比は、信号強度が十分に強い範囲において概ね一定値であり、以後はこの放射率比を3.56として温度計算を行うこととした。

燃焼実験は、東京大学柏キャンパスにある極超音速高エンタルピー風洞を利用して実施した。供試体として、試験用小型エンジンのアフターバーナを模擬した流路面積約十分の一の実験用燃焼器を二種製作し、目的に応じて使い分けた。一方は内壁面に耐熱コンクリートを打設した耐熱燃焼器であり、試験用小型エンジンに六本設けられている燃料噴射器を一本のみ挿入できる。もう一方は燃焼器の壁面に冷却水の流路を設けた水冷可視化燃焼器であり、高さが耐熱燃焼器の半分となっている代わりに、燃料噴射器を二本挿入できる。燃焼器内圧力を設計点である0.3MPaまで上げるため、いずれの燃焼器を使用する際も下流にノズルを取り付けた。

試験用小型エンジンのアフターバーナに用いられている燃料噴射器は、上流側が半円形、下流側が矩形形状のストラット型であり、直径1.0mmの燃料噴射孔が上流と下流の二列に分かれて配置されている。実験用の燃料噴射器の作成に当たっては、噴射角度

と噴射孔の配置を変えた噴射器を7種類作成し、実験に供した。

耐熱燃焼器は燃焼効率測定実験及びNO_x排出量測定実験に供した。燃焼効率は、実際の発熱量と理論発熱量の比で定義し、エンタルピー収支計算によって求めた。燃焼ガスの温度は、燃焼器出口近傍に挿入されたB種熱電対によって計測した。NO_x排出量の測定に当たっては、サンプリングプローブをノズル出口中央に挿入することで燃焼ガスを採取し、採取されたガスを約千倍に希釈したうえでNO_x濃度計測器に導入した。

水冷可視化燃焼器は、燃焼器内部の高速度カメラによる撮影及び粒子添加可視二色法による温度分布測定に供した。可視化領域は燃料噴射器周辺及びノズル近傍の二か所であり、厚さ15mmの石英ガラスを設置できるようになっている。炭化ケイ素粒子の燃焼器内部への導入は燃料供給配管から行うこととし、燃料自身の流れによって粒子を巻き上げ燃焼器に供給する機構を作成した。

燃焼効率の測定実験では、いずれの燃料噴射方法においても、当量比3~6の範囲では当量比の増加に伴って一定の燃焼効率の改善が見られた。これは、燃料噴射の運動量の増加によるものと考えられ、特に運動量のうち主流に垂直な成分の増加が、燃焼効率の改善に寄与しているものと考えられる。この効果は、上流側と下流側の噴射孔を同じ高さに配置した燃料噴射器（以後通常配置）については、上流側よりも下流側のほうが大きく、また主流に対する燃料噴射の運動量比はより明確に燃焼効率との相関を示すことが分かった。また、通常配置の燃料噴射器では、当量比4以上の領域において燃焼効率の頭打ちが見られたが、上流と下流の噴射孔を交互に配置した場合（以後千鳥配置）では燃焼効率の改善が続き、当量比5付近においてほぼ100%の燃焼効率を実現できた。

NO_x排出量測定実験では、安定した過濃燃焼における燃焼温度の上昇に伴う燃焼ガス中のNO_x濃度の上昇が、過去に実験によって報告されている希薄燃焼時の傾向と比較して緩やかなことが確認された。過去に行われた数値計算では、水素過濃燃焼場の還元雰囲気NO_x生成を抑制する効果について指摘されており、本研究の結果はこれを裏付けることとなった。燃料噴射器による違いは見られなかった。下記の燃焼振動発生時に測定されたNO_x濃度は、同程度の燃焼温度における安定な燃焼時と比較して非常に高かった。

燃焼器内部の直接撮影によって、過濃燃焼時における燃焼振動の発生が確認された。燃焼振動発生時には燃焼器内の火炎が消炎と再着火を繰り返しており、千鳥配置の燃料噴射器では当量比1.8以上の条件で、通常配置の燃料噴射器では全ての過濃条件において燃焼振動が観察された。燃焼振動の周波数は500ヘルツ弱であり、これは燃焼器長さに対する気柱振動数と一致している。燃焼振動が定常化する直前において、燃焼噴射器間に形成される火炎が保炎し続けられず周期的に下流に押し流されていく様が観察された。このことから、燃料噴射器間における保炎の不安定性が燃焼振動を誘発していることが考えられ、燃料噴射器間に形成される保炎領域を、大量に供給される水素が吹き

消えさせてしまっていることが原因として疑われる。また、燃焼振動発生時には周期的に高温領域が生成されるため、窒素酸化物濃度が平均燃焼温度に対して高くなったと考えられる。

粒子添加可視二色法を実験用燃焼器に適用し、当量比及び燃料噴射方法の違いによって変化する高温領域を計測した。希薄燃焼時は燃料噴射器下流の再循環領域及び主流と再循環領域の間のせん断層に高温領域が集中していたが、燃料噴射の運動量の上昇に伴い燃料噴射器間にも高温領域が見られるようになった。過濃燃焼においては、ノズル出口付近の平均温度が近い希薄燃焼時と比較すると、燃料噴射器周辺に形成される高温領域が狭くなっており、この違いも NO_x 生成の抑制に影響していることが考えられる。

粒子添加可視二色法の測定誤差は、位置については粒子温度の収束にかかる時間より最大で0.96mm程度、温度についてはカメラの受光素子の変換により最大で $\pm 50\text{K}$ 程度となった。また、粒子を添加することによる燃焼ガスの温度低下は、最大でも10K未満であった。これらを元に燃焼器内の温度分布計測結果を検証すると、燃料噴射器直後の高温領域、及び下流側可視化領域全域の温度分布は概ね正確に得られたが、特に流れ方向に短い、燃料噴射器間に形成される高温領域については、その厚さを実際の半分程度に見積もっていることが示唆された。

以上、本論文は、予冷ターボジェットエンジンのアフターバーナを模擬した小型燃焼器を対象として、水素燃焼特性および NO_x 排出特性に関する実験を行うとともに、高温高圧の水素燃焼場に適応できる簡便な温度分布測定法の開発を行い、エンジンの高性能化、低環境負荷化に資する燃焼効率及び NO_x 排出係数に関する知見と粒子添加可視二色法の実用性を明らかにした。