

氏 名	濱 純
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和52年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第5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)機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	高速噴流炎における燃焼過程に関する実験的研究
指 導 教 官	東北大学教授 大塚 芳郎
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大塚 芳郎      東北大学教授 弓削 達雄 東北大学教授 武山 斌郎

## 論 文 内 容 要 旨

### 第1章 緒 論

实用燃焼装置の大半に利用されている乱流炎の燃焼過程については、最も基本的な気体燃料による予混合炎においても充分解明されたとは言い難い。特に今日、汚染物質の抑制や省エネルギーの立場から予混合（又は部分予混合）型燃焼器への指向がみられ、乱流予混合炎の燃焼過程の解明は急務となっている。

乱流予混合炎の研究には高速写真、光学測定などにより乱流炎の構造を取扱った研究が多く、実際に燃焼過程を濃度測定により広範囲に調べた研究は比較的少ない。

しかし乱流炎は層流炎と異なり、燃焼過程が乱れに強く影響を受けることからして、乱れが非常に強い場合、乱れに反応が追従出来なくなることが考えられる。更に乱流炎の構造について、乱れが強くなると火炎面が分裂し、島状の火炎要素を形成するとする物理的モデルも報告されて

いる。それ故、たとえ理論混合比においても、乱れが強い場合完全燃焼しているかどうか明確でない。以上の考え方からすれば、乱流炎の濃度測定を詳細に行うことは、乱流炎の汚染物質の生成過程の解明に不可欠であり、又乱流炎の構造の解明にも有効な一手段と思われる。

本研究ではこれらの観点に立ち、リセス保炎器より安定した高速噴流炎の燃焼過程について、流速・混合比・乱流炎周囲の雰囲気・火炎の寸法などの条件を広範囲に変化させ、温度及び濃度測定を行い、乱流燃焼過程が急変する流速（臨界流速）を見出し、この特徴を支配する関係式を明らかにしている。又この燃焼過程の特異な変化と乱流炎の汚染物質の生成過程及び燃焼機構との関連性について検討を加えている。

## 第2章 リセス保炎器の開発

燃料-空気の高速噴流炎の燃焼過程を、混合比・流速などの広範囲の燃焼条件について調べるためには保炎器が不可欠である。本研究では、他の保炎器と比較し安定性能が良好であり、又ブロンズ型火炎を形成するため乱流炎の燃焼過程を調べることに適しているリセス保炎器を用いる。

リセス保炎器は高速気流中にくぼみ（リセス）を設けることにより、低速・高温領域を形成し、このリセス部より火炎を安定させる方法である。本研究では噴流炎を安定させるため軸対称リセス保炎器を必要とし、この研究が皆無であること、又乱流炎への保炎器の影響を出来る限り小さくする必要があるのでを考慮し、リセス保炎器の開発を行った。その結果、作製した数種類の保炎器の中ではステンレス製一体作りのリセス保炎器が最適であることを見出した。

## 第3章 開放炎における燃焼過程

第2章で開発したノズル径2mmに対する最適リセス保炎器を用いて、プロパン-空気の開放乱流炎の温度及び濃度（主に一酸化炭素及び炭化水素類）を広範囲の混合比、流速にわたり測定し、開放炎の燃焼過程を詳細に調べた。その結果、

1. 過濃混合比、低速を除き、火炎ブラシの半径方向温度分布は相似であり、火炎の最高温度を示すリセス出口からの軸方向距離及び肉眼観察からの火炎の長さは流速依存性が小さいことが得られ、燃焼過程は中心軸上一定位置の火炎温度で近似的に代表出来ることがわかった。更にこの温度の流速による変化を検討し、温度が不連続的に低下する流速が存在することを見出した。
2. 詳細な濃度測定より、一酸化炭素及び燃料であるプロパン濃度についても温度と同様に不連続的に増加する流速が存在し、この流速は温度の場合とほぼ同一流速であった。更にリセス出口付近の温度を詳しく検討し、この不連続的变化は火炎ブラシにおいて生じることを明確にした。（この流速を臨界流速  $V_{cr}$  と呼ぶ。）

3. ノズル流速が臨界流速以上では、火炎ブラシにおける反応は急激に低下し、これに対応して

火炎後流における未燃焼成分濃度も急激に増加することから、臨界流速は一酸化炭素及び炭化水素類について汚染物質発生限界流速であることがわかった。

更にメタン、エチレンを燃料とした場合について、温度及び一酸化炭素濃度の流速による変化を調べた結果、臨界流速はプロパンの場合と同様に存在することを見出した。又各燃料、混合比に相当する層流燃焼速度と臨界流速との関連性を検討し、臨界流速は層流燃焼速度と一義的に相関があることがわかった。但し過濃混合比では相関は異なり、この理由として開放炎であるため過剰燃料と周囲空気が反応し、予混合炎の外側に拡散炎を形成することによる影響を考察した。

#### 第4章 臨界流速に対する寸法効果

前章で得られた臨界流速を生じる現象を更に明確にすることを目的として、

(1) 前章の燃焼装置を踏襲し、乱流炎周囲を開放状態から断熱に近い状態に保持した場合のプロパン-空気の乱流炎（断熱炎と略す）について、臨界流速の挙動及び燃焼過程を開放炎と比較検討した。

(2) 前章の燃焼装置と幾何学的相似で寸法を大にした場合、リセス部長さを短くすることにより保炎器の燃焼過程への影響を更に小さくした場合、及びその保炎器と幾何学的相似で寸法を大とした場合など合計10種類を作製し、開放炎における臨界流速の寸法効果を調べた。更にリセス出口後の流れ特性のリセス長さによる影響及び寸法による影響を把握するために、火炎の存在しない場合の流速及び乱れの強さも測定した。その結果、

1. 断熱炎において、流速に対する一酸化炭素濃度の変化は測定した混合比及び流速の範囲内で直線的な増加を示し、開放炎における不連続的な増加を示さない。それ故臨界流速は開放炎の燃焼過程の特徴であることがわかった。

2. 各々の保炎器で得られた臨界流速 ( $V_{cr}$ ) を、代表寸法としてノズル径 ( $D$ ) 及び層流燃焼速度 ( $S_u$ ) との関連性を検討し、リセス部が長い保炎器の場合を除き、燃焼過程の特異な変化を支配する関係式として、

$$V_{cr}/D \propto S_u^2 \dots\dots\dots (1) \quad \text{が得られた。}$$

尚リセス部が長い場合に相関が異なる理由として、リセス通過時の燃焼割合が大きいこと又流れ場への保炎器の影響が他と比べて大きいことから、燃焼過程の寸法依存性に保炎器内の影響が含まれることを考察した。

3. (1)式の物理的意味を乱流炎の構造の観点より考察し、乱れが強い場合に乱流炎の部分的消滅の可能性を指摘した。この事については更に微視的な検討が今後の課題として残る。

## 第5章 高速噴流炎における窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）の挙動

今日の汚染物質の焦点である窒素酸化物については、一次元炎の基礎的解明から実用燃焼器における挙動及び低減方法まで幅広く研究されている。その中で実用燃焼器の大半を占める乱流拡散炎では、燃焼過程の制御性が悪いことに関連して、Prompt NOの抑制が難しいことが指摘されている。一方乱流予混合炎については、燃焼過程の制御が容易であり、Prompt NOも希薄燃焼させることで解決できる利点をもつが、比較的研究が少ない。

本章では、前章までの燃焼装置をすべて用い、乱流予混合炎の窒素酸化物の挙動を広範囲に調べた。その結果、

1. 窒素酸化物は過濃混合比の方が希薄混合比より多く生成される。又断熱炎では窒素酸化物生成量が開放炎より多く、窒素酸化物はほぼ一酸化窒素であるのに対し、開放炎では一酸化窒素以外の窒素酸化物が大部分を占める。更に流速依存性は開放炎で著しく、特に高速、希薄混合比では一酸化窒素が火炎ブラシ内で生成されなくなる。以上より窒素酸化物の生成量及びその組成は混合比、流速、火炎周囲の状態に大きく影響されることがわかった。
2. 開放炎希薄混合比では、火炎ブラシ内の一酸化窒素濃度がほぼ零となる流速が臨界流速とはほぼ一致することから、臨界流速は一酸化窒素に関して消滅限界流速であり、火炎寸法の小さい方が一酸化窒素生成量が少ない。更に一酸化窒素濃度の測定からも燃焼過程の変化の判定が可能であることがわかった。
3. すべての窒素酸化物の分布には一酸化窒素の最大値の前に一酸化窒素以外の窒素酸化物の最大値が存在し、この最大値は理論比より希薄側では大部分二酸化窒素と考えられることから、一酸化窒素以外の窒素酸化物をも含む反応機構を考慮する必要性が確認された。

## 第6章 二次空気の燃焼過程（NO<sub>x</sub>）に及ぼす影響

前章までに乱流予混合炎の周囲雰囲気の状態が燃焼過程に大きく影響を与えることを知った。

本章では更に乱流炎周囲に同心軸流の形で二次空気を送入出来るように断熱炎装置を改良し、二次空気による燃焼過程への物理的、化学的影響を窒素酸化物の挙動より調べた。又本装置は乱流予混合炎を用いた炉内燃焼の最も簡単な装置と考えられるから、二次空気による火炎ブラシ及び排出口付近の窒素酸化物の挙動にも検討を加えた。

その結果、

1. 二次空気比（一次側予混合気の質量流量に対する二次空気の質量流量） $\lambda < 1$ では断熱炎炎に、又 $\lambda > 4$ では開放炎に近い燃焼過程となることが得られた。又二次空気の排出口付近の窒素酸化物への影響として、一酸化窒素濃度が $\lambda > 2$ で急激に減少し、高速及び希薄混合比では特に排出されなくなることが得られた。これらの物理的要因として、二次空気量による再循環領域の

形成の有無及びその大きさの影響を考察した。

2. 二次空気の代わりに純アルゴンガス、純酸素を周囲流とした場合との比較から、二次空気は過濃混合比だけでなく、理論比より希薄混合比においても直接反応に影響を与えることが得られた。特に窒素酸化物の挙動として、火炎ブラシ内で生成される一酸化窒素濃度が少ない特徴を得た。

3. 二次空気の臨界流速への影響について、一酸化窒素濃度が火炎ブラシ内で零となる流速から調べ、断熱炎では臨界流速が測定不可能な高速となる経過を得た。

4. 汚染物質の低減の立場から、乱流予混合炎では混合比による制御の他に、臨界流速を逆に利用する方法について考察した。

## 第 7 章 結 論

結論として本論文を要約し、第 2 章から第 6 章までの研究成果について総括した。

本研究に対して常に懇切なる御指導を賜りました大塚芳郎教授に深く感謝の意を表します。

## 審査結果の要旨

燃焼装置・内燃機関の燃焼に伴って発生する大気汚染物質の低減が強く要求される現在、乱流炎の燃焼過程の解明は重要な問題である。本論文は、小寸法の高速噴流によって発生する高周波乱流炎を対象とし、火炎ブラシ内で発生する熱、一酸化炭素、未燃焼炭化水素および窒素酸化物を指標として、燃焼過程を追究した成果をまとめたもので、7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、高速噴流炎を安定させるに適した保炎器の選定を行っている。数種の保炎法を比較して、リセス保炎器が本研究に最適である理由を述べ、4種のリセス保炎器の比較試験を行って、安定性能の良好な保炎器を見出している。

第3章では、直径2mmのノズルから噴出するプロパン・空気混合気噴流によって生ずる開放炎の構造の詳細な測定を行った。希薄混合気では温度分布の相似性と炎長の不変性が存在することを検証して、火炎ブラシ内の任意の一点の温度を燃焼過程の流速による変化の指標とみなせることを確認した後、ブラシ内の中心軸上の一点における温度の流速による変化を測定して、燃焼過程が不連続的变化を示す臨界流速が存在することを見出した。一酸化炭素およびプロパン濃度によっても同様の結果が得られた。また、メタンおよびエチレンの火炎についても臨界流速を測定し、臨界流速と燃焼速度の間の一義的關係を見出している。

第4章では、断熱炎には臨界流速が見出されないことより、開放炎における燃焼過程の不連続的变化は、周囲の低温空気との混合に起因するものとして、寸法効果を求めるためノズル直径3, 4, 5mmの場合を測定した。その結果より、ノズル直径3mm以上では、リセス内の予燃焼およびみだれの減衰の影響を除外すれば、臨界流速とノズル直径の比は燃焼速度の二乗に正比例することを指摘している。

第5章では、開放炎と断熱炎の窒素酸化物分布を詳細に測定して、両火炎における生成過程と一酸化窒素分率の差異を明らかにするとともに、開放炎においては臨界流速以上の流速では一酸化窒素が発生しないことを見出している。

第6章は、窒素酸化物生成に対する二次空気の影響を調査したもので、火炎後流の一酸化窒素分率が全空気比3付近で急低下する結果を得ている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、リセス保炎器に安定した高速噴流炎の構造分析を詳細に行い、臨界流速を見出すなど燃焼過程に関し多くの知見を得たもので、燃焼工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。