九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

希薄予混合気の消炎限界近傍の火炎特性の計測および燃焼促進に関する研究

川添，裕三

https://doi.org/10.15017/1931903

出版情報：九州大学，2017，博士（工学），課程博士
バージョン：
権利関係：

（様式２）

氏　　名　：川添　裕三

論 文 名　：希薄予混合気の消炎限界近傍の火炎特性の計測
　　および燃焼促進に関する研究

区　　分　：甲

論　文　内　容　の　要　旨

内燃機関の熱効率向上および排出ガスの清浄化のために,比熱比の増加による理論熱効率の向上,火炎温度の低下による冷却損失および NOx 排出量の低減といった利点を持つ希薄燃焼が有効である．しかし，希薄燃焼では，燃焼速度の低下による燃焼期間の増大から図示熱効率が低下してしまうために，燃焼促進が必要である．燃焼促進手法として乱流強化が挙げられるが，乱流予混合希薄燃焼においては，乱れによる燃焼促進効果に限界があること，混合気の希薄化に伴い小さい乱れ強さで消炎してしまうという 2 つの課題がある．乱れによる燃焼促進効果に限界が存在することは,火炎伸長による局所的な消炎が原因と考えられている．火炎伸長とは，速度勾配の存在する場に火炎が存在する場合，速度勾配が熱や物質の輸送のバランスに影響を及ぼし火炎温度や燃焼速度が変化する現象である．消炎限界近傍の火炎では火炎温度が低下すると考えられている．また，反応帯の厚さは，火炎温度の低下による燃焼速度の低下や反応帯の厚さほどの小さいスケールの渦によっても増大すると考えられている．しかし，乱流予混合火炎の局所的な温度や反応帯の厚さを計測する決定的な手法が確立されていないために，火炎伸長による火炎温度の低下や反応帯厚さの変化が実験的に明らかにされた例はない．高速で変動する乱流予混合火炎の局所的な温度や反応帯の厚さを計測することは，高効率の内燃機関の開発や乱流予混合火炎の構造を把握する上で重要であると考える．また，乱流予混合希薄燃焼では，混合気の希薄化に伴い小さい乱れ強さで消炎してしまうことから，乱流強化に加わる新たな燃焼促進手法が必要である．水素添加やプラズマ点火を用いた燃焼促進手法に関する研究では，水素の生成・貯蔵装置の搭載や既存の点火装置の変更が想定されている．本研究では，比較的容易に内燃機関に装着可能な装置として酸素富化膜を想定した．酸素富化膜は，膜両面の差圧を利用して酸素富化空気を生成する装置で，内燃機関の吸気系に取り付けることで，その差圧を利用して燃焼期間の短縮が期待される酸素富化燃焼を実現できる可能性がある．このような観点から，本研究の目的は，伸長を受ける予混合火炎の消炎限界近傍の火炎温度および反応帯の厚さを計測する手法を確立すること，燃料希薄な条件における酸素富化の燃焼促進効果を明らかにすることである．

本論文は以下の 6 章で構成されている．

第 1 章では，乱流予混合希薄燃焼における課題を述べ，本研究の目的と意義を明確にした．

第 2 章では，予混合火炎の OH，CH，C_2(1,0)，C_2(0,0)ラジカルの化学発光を計測する装置について，従来の単レンズ系を用いた発光分光システムに比べて，高い空間分解能を持つカセグレン光学系を用いた発光分光システムについて述べた．

第 3 章では，伸長を受けるメタン・空気，プロパン・空気およびブタン・空気予混合火炎の消炎限界近傍の温度を計測する手法を確立するために，第 2 章で述べたカセグレン光学系を有する発光

分光システムを用いて，OH，CH，C_2(1,0)，C_2(0,0)の化学発光強度の比と火炎温度の関係に与えるひずみ率（対向流バーナー間の軸方向の速度勾配であり，火炎伸長の影響を表す指標）の影響を詳細に調べ，以下の結論を得た．伸長を受けるメタン・空気層流予混合火炎では，ひずみ率が増加すると，火炎温度は減少するが，C_2(0,0)／C_2(1,0)の発光強度比はほとんど変化しない．これはメタン分子中に炭素原子が 1 つしか存在しないためと思われるが，このためメタン・空気層流予混合火炎の温度を C_2(0,0)／C_2(1,0)の発光強度比より推定するのは困難である．一方，分子内の炭素原子数が 2 以上であるプロパンもしくはブタンを用いた場合，ひずみ率が増加すると，火炎温度と C_2(0,0)／C_2(1,0)の発光強度比がともに減少し，その関係は当量比に依存する．よって，対向流バーナーのような平面火炎については，当量比が既知であれば，伸長を受ける層流予混合火炎の火炎温度が C_2(0,0)／C_2(1,0)の発光強度比より推定可能である．一方，乱流予混合火炎のような曲率を有する火炎では，選択拡散効果により局所的な当量比が変化し得るため，その推定も必要となる．このため，プロパン・空気およびブタン・空気層流予混合火炎について OH／CH の発光強度比を計測したところ，OH／CH の発光強度比は当量比の増加とともに減少するが，ひずみ率にも依存することが分かった．すなわち，OH／CH の発光強度比より当量比を推定するにはひずみ率が既知である必要がある．火炎温度は当量比，ひずみ率に依存するが，C_2(0,0)／C_2(1,0)および OH／CH の発光強度比もそれぞれ当量比，ひずみ率に依存する．よって，両強度比に与える当量比，ひずみ率の影響を前もって詳細に調査しデータベースを作成しておけば，当量比およびひずみ率の 2 未知数に対して方程式が 2 つ存在することになり解が定まる．このように，曲率を有する火炎についても C_2(0,0)／C_2(1,0)および OH／CH の発光強度比を計測することによって，火炎温度を推定可能である．

第 4 章では，プロパン・空気およびブタン・空気層流予混合火炎の消炎限界近傍の反応帯厚さを計測する手法を確立するために，第 2 章で述べたカセグレン光学系を有する発光分光システムを用いて，OH，CH，C_2(1,0)，C_2(0,0)の化学発光強度の最大ピーク間距離 d（最も未燃側に位置する化学発光強度のピーク値の位置と最も既燃側に位置する化学発光強度のピーク値の位置の差）の当量比およびひずみ率への依存性を調べ，以下の結論を得た．伸長を受けないプロパン・空気およびブタン・空気層流予混合火炎の当量比の変化による反応帯の厚さの変化の割合は，d を用いて計測可能である．また，伸長を受けるプロパン・空気およびブタン空気層流予混合火炎では，ひずみ率が増加すると，d は単調に減少し，消炎限界近傍で増加する．本研究で用いた発光分光システムにより，d の当量比およびひずみ率に起因する変化を計測可能である．

第 5 章では，希薄燃焼における酸素富化の燃焼促進の効果を明らかにするために，メタンの供給熱量を一定として層流予混合火炎に与える酸素富化の影響を調査した．また急速圧縮膨張装置を用いて内燃機関の燃焼期間，図示熱効率，NOx 排出量に与える酸素富化の影響を調査し，以下の結論を得た．酸素濃度を増加させることで層流燃焼速度は向上し，酸素濃度 40%もしくは 50%にてピーク値を持つ．また，伸長を受ける希薄予混合火炎の消炎限界のひずみ率は，酸素富化によって増加する．急速圧縮膨張装置を用いた実験の結果，酸素濃度を増加させることで，希薄燃焼において燃焼期間が短縮し，図示熱効率が向上した．これは，層流燃焼速度の向上とエンドガスが自着火しやすくなることが主な要因である．燃料濃度 8.63%（当量比 ϕ = 0.9 [O_2：21%]）で酸素濃度を 21%から 50%に増加させた場合に，燃焼期間が約 41%短縮され，図示熱効率が 1.4 ポイント向上した．さらに，本研究で調べた範囲では，酸素濃度を増加させても NOx 排出量は増加しない．

第 6 章では，本論文の総括を述べた．