

氏名	井原 ただよし
学位の種類	博士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 93 号
学位授与の日付	平成 16 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	エネルギー科学研究科 エネルギー変換科学専攻
学位論文題目	燃料噴霧ならびにガス噴流の着火・燃焼過程に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 塩路昌宏 教授 石井隆次 教授 石山拓二

論文内容の要旨

本論文は、液体燃料噴霧ならびにガス噴流の着火・燃焼過程を対象とし、とくに燃料と空気の不均一と乱流混合の作用に着目して燃焼機構の解明を目指したものであり、全 6 章からなっている。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景と目的について述べている。まず、高効率動力源として広く使われている内燃機関の燃焼方式について概観し、より一層の高効率化と排気浄化を実現するためには、液体および気体燃料の直接噴射による燃焼制御が必要となることを示している。これを背景として、基本となる燃料噴霧ならびにガス噴流の着火・燃焼過程の解明が急務であることを述べ、関連研究の動向と課題をまとめるとともに解明すべき点を明示し、工学的のみならず工業的観点から本研究の重要性について明らかにしている。

第 2 章では、高乱流中で発達する非正常噴霧の混合気形成過程において、濃度・温度の強い不均一が乱流混合により均一化する過程を確率過程論モデルで記述し、同時に反応・着火モデルを一段総括反応で考慮することによって燃料噴霧の自着火・燃焼過程を予測し、実測と比較しながらその合理性について検討している。その結果、燃料の噴射開始から着火までの時間遅れ(着火遅れ)の温度依存性や、燃焼過程の熱発生経過などの自着火過程の基本特性に関して実測における傾向を再現し、モデルの妥当性と乱れの重要性を明らかにしている。さらに、燃料濃度の確率密度分布の時間推移に基づき、乱流混合の速さと化学反応速度の寄与度を着火遅れ期間と関連して解析するとともに、燃料噴射量の変化、高圧噴射の作用、吸熱率の変化、など諸変数に対する再現性を確認し、エンジン条件への適用を試みている。

第 3 章では、容器内の高温・高圧空気に燃料噴霧を噴射して自着火させる実験を行い、燃料噴霧の物理過程と化学反応過程の競合が着火遅れの温度依存性に及ぼす影響について種々の条件において調べている。その結果、*n*-ヘプタン噴霧は雰囲気圧力が 2MPa の場合、負の温度依存性 (NTC) を示す温度領域が存在し、この温度領域では容器内圧力経過から二段着火が認められ、さらに噴霧のシャドウグラフ高速度可視化画像から燃焼室壁面に到達した噴霧先端部の混合気が均一化した後に着火することなどを示すとともに、この現象を噴霧内の平均濃度・温度の時間推移と予混合気の着火遅れ特性に基づいて合理的に説明している。

第 4 章では、第 3 章の実験で得られた知見をもとに確率過程論モデルの改良を試み、化学反応過程を簡略化した 5 段反応モデルを確率過程論モデルに組み込んで、混合気の濃度・温度分布の時間推移と NTC 領域を含む着火遅れの温度依存性について記述・考察している。その結果、改良モデルを用いて計算した着火遅れの温度依存性は、雰囲気圧力 4MPa の実測値とよく対応し、さらに噴霧内の当量比と温度の分布に基づき、低い雰囲気温度においては、均一化が進んで分布が狭く集中した後に着火が起きること、雰囲気温度が高いと着火する混合気の当量比分布は広く、量論比より濃い混合気も着火すること、着火遅れの温度依存性は低い温度では均一混合気の特徴を反映し、アレニウス表示上で直線的となるが、混合気形成遅れにより均一混合気より緩やかな傾きを持つこと、温度が高いと均一予混合気の着火が反映されないことなど、広範囲のエンジン条件における燃料噴霧の着火に関する基本特性を明らかにしている。

第5章では、種々の雰囲気および噴射条件における天然ガスおよび水素噴流の着火・燃焼特性を、第3章と同様の定容燃焼装置を用いた実験により詳細に調査している。その結果、天然ガスの着火遅れ・熱発生率の温度依存性について軽油燃料と傾向は相似しているものの、対応する雰囲気温度が相違することを示すとともに、可視化画像から噴流と火炎の発達について軽油噴霧との類似性を明らかにしている。さらに、水素噴流の場合は天然ガスよりも自着火の下限温度が100K低く、着火遅れの温度依存性は天然ガスと定性的には一致するが同温度で比較すると、着火遅れは天然ガスよりも著しく短くなること、など燃料種の異なるガス噴流の着火・燃焼特性について、新規な知見を提供している。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約し、今後の研究の方向性について言及している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、高効率動力源として広く使われている内燃機関における燃料噴霧ならびにガス噴流の着火・燃焼過程を対象とし、物理・化学過程が複雑に関連する現象についての有用な知見をまとめたもので、主な成果は次のとおりである。

1. 高乱流中で発達する非定常噴霧の混合気形成過程において、濃度・温度の強い不均一が乱流混合により均一化する過程を確率過程論モデルで記述し、同時に反応・着火モデルを考慮することによって、自着火過程の基本特性を表現できることを示した。これにより、燃料の噴射開始から着火までの時間遅れ（着火遅れ）の温度依存性や、燃焼過程の熱発生経過の実測における傾向を再現し、モデルの妥当性と乱れの重要性を明らかにした。

2. 容器内の高温・高圧空気に燃料噴霧を噴射して自着火させる実験を行い、着火遅れの温度依存性を種々の条件において調べた。その結果、着火遅れが長くなる条件では、着火遅れに負の温度依存性が現れること、このとき容器内圧力経過から二段着火が認められ、さらに噴霧のシャドウグラフ高速度可視化画像から燃焼室壁面に到達した噴霧先端部の混合気が均一化した後に着火することなどを示すとともに、この現象を混合気形成と予混合気の着火遅れ特性に基づいて合理的に説明した。

3. 以上の実験結果に基づき、着火過程を多段連鎖反応により記述するモデルを確率過程論に基づく物理モデルに組み込んで、混合気の濃度・温度分布の時間推移と着火遅れの温度依存性について記述・考察した。その結果、雰囲気温度が低いと噴霧内の濃度・温度が均一化してから着火に至るため予混合気の着火特性を反映するが、高温雰囲気では噴射直後の不均一な状態で、先に着火条件を満たした量論比に近い混合気の部分から着火を開始することなどが明らかになった。

4. 天然ガスおよび水素噴流についても定容燃焼実験を行い、着火・燃焼の基本特性を明らかにするとともに、噴射条件および雰囲気条件の影響について系統的に調べた実験から、ガス噴流と液体噴霧の発達状況と着火遅れの温度依存性の類似点と相違点を示した。

以上、要するに本論文は、高温高圧雰囲気中で発達する燃料噴霧ならびにガス噴流の着火・燃焼機構を、定容燃焼装置を用いた自着火過程の計測と確率過程論モデルを基礎とする理論計算によって明らかにしたものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年2月24日実施した、論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。