

非定常拡散火炎先端部における 高濃度 NO_x 生成特性に関する研究

学位論文内容の要旨

ディーゼル噴霧燃焼は高効率で機関サイズにかかわらず高い燃焼制御性（ノッキングがなく負荷追随性が予混合圧縮着火燃焼に比べて良好）を有するが、窒素酸化物の低減は極めて難しく、そのため研究の主流は排気後処理や、低NO_x性を有する均一予混合圧縮着火燃焼等に移行しつつある。しかし、均一予混合圧縮着火燃焼は原理的に部分負荷に限定され、今後益々高まると考えられる高効率化の要求に答えるためには、高過給・高負荷燃焼を実現するための拡散噴霧燃焼を主体とした燃焼研究が不可欠と思われる。

定常噴流火炎では噴射速度を増加させると燃焼領域の滞留時間が減少し、反応時間依存性の強い単位燃料当たりの窒素酸化物は減少するのに対して、ディーゼル噴霧火炎では高圧噴射化によりむしろ増加する傾向を示す。ディーゼル機関における高圧噴射時のNO_x増加は、可視化観察などから高温領域が燃焼室内に広く分布することが原因と説明されているものの、定常噴流火炎との差異を説明したものは見当たらない。

そこで、非定常噴流の構造より非定常火炎の流速や当量比について理論的考察を行い、非定常噴流火炎におけるNO_xの主たる生成は流速が遅く非定常性の強い火炎先端部であると推測した。本研究は上記推測を確認し、ディーゼル燃焼における低NO_x化の手がかりを得ることを目的とするものであり、非定常噴流拡散火炎先端部におけるNO_x生成特性に着目して、取り扱いが容易な気体燃料を用いて実験および数値シミュレーションによる検討を行った。

論文は以下の5章から構成した。

第1章は序論であり、研究の背景について述べるとともに、本研究の目的および得られた結果の概要について論述した。また、ディーゼル機関におけるNO_x低減手法ならびにそれらの研究動向を紹介した。さらに、NO_x測定方法とそれらの研究動向もあわせて紹介した。

第2章では、非定常火炎におけるNO_x生成メカニズムについて理論的考察を行い、非定

常拡散火炎先端部でNO_x生成が盛んなことを示した。また、化学反応を伴う噴流構造を容易に観察するため、水槽中に液体が噴射可能な装置を製作し、噴射により酸性溶液と塩基性溶液を水槽中で中和反応させて、非定常噴流拡散燃焼と類似の現象を生じさせ、可視化観察を行った。その結果、中和反応を伴う液体-液体噴射により、非定常噴流拡散燃焼過程に概ね対応した微視的構造の観察を時間スケールを拡大して行うことが可能であることが観察された。また、可視化観察結果より、非定常噴流先端部と噴射終了後の噴流尾部において化学反応が盛んな領域が広く分布することが観察された。

第3章では、非定常噴流拡散火炎の噴射期間とNO_x生成量の関連を検討した。その結果、噴射期間の増加に伴い[NO_{ei}]は増加してピークを示すが、さらに噴射を続けると減少した後、安定して推移した。この結果より、非定常性の強い非定常噴流拡散火炎先端部でNO_x生成量が多いことを推測した。そこで、NO発光スペクトルを用いてNO生成領域の特定実験を行った。その結果、火炎先端部におけるNO発光スペクトル強度が他の燃焼領域よりも大きく、その領域でNO_x生成量が多いことが観察できた。更に、非定常火炎におけるOHラジカルの発光分布を調べ、火炎先端部においてOHラジカル濃度が大きく化学反応が盛んなことも観察できた。

第4章では、非定常噴流拡散火炎先端部においてNO_x生成量が多いという特徴を考慮して、ディーゼル燃焼におけるNO_x低減法の検討を行った。更に、そのNO_x低減法に基づいた試行的実験として、燃料を噴射する直前に不活性ガスを噴射して流れ場を与え、火炎先端部を消滅させることによりNO_x生成量を減らす燃焼方法を検討した。その結果、不活性ガス先立ち噴射によりNO_x生成量を減少させることが可能であることが観察できた。

第5章は、本研究の結論であり、得られた結果の概要を記述した。

以上、本研究において非定常拡散火炎の火炎先端部にある非定常領域が主たるNO_x生成領域であることを明らかにした。また、ディーゼル燃焼におけるNO_x低減手法として、先立ち噴射を行い、燃料噴射前に流れ構造を与えることが低NO_xに有効であることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 菱 沼 孝 夫
副 査 教 授 池 川 昌 弘
副 査 教 授 宮 本 登
副 査 助 教 授 近 久 武 美

学 位 論 文 題 名

非定常拡散火炎先端部における 高濃度 NO_x 生成特性に関する研究

ディーゼル噴霧燃焼は高効率で機関サイズにかかわらず高い燃焼制御性（ノッキングがなく負荷追従性が均一予混合圧縮着火燃焼に比べて良好）を有するが、窒素酸化物の低減は極めて難しく、そのため研究の主流は排気後処理や、低 NO_x 性を有する均一予混合圧縮着火燃焼等に移行しつつある。しかし、均一予混合圧縮着火燃焼は原理的に部分負荷に限定され、今後益々高まると考えられる高効率化の要求に答えるためには、高過給・高負荷燃焼を実現するための拡散噴霧燃焼を主体とした燃焼研究が不可欠である。

定常噴流火炎では噴射速度を増加させると燃焼領域の滞留時間が減少し、反応時間依存性の強い単位燃料当たりの窒素酸化物は減少するのに対して、ディーゼル噴霧火炎では高圧噴射化によりむしろ増加する傾向を示す。ディーゼル機関における高圧噴射時の NO_x 増加は、可視化観察などから高温領域が燃焼室内に広く分布することが原因と説明されているものの、定常噴流火炎との差異を説明したものは見当たらない。

そこで、非定常噴流火炎の流速や当量比について理論的考察を行い、非定常噴流火炎における NO_x の主たる生成は、流速が遅く非定常性の強い火炎先端部にあるとの仮説を立てた。本論文は、上記仮説を実験ならびに数値計算から実証し、さらにこの知見に基づいて具体的な新しい NO_x 低減法を提案しようとするものである。

第 1 章は序論であり、研究の背景について述べるとともに、本研究の目的および得られた結果の概要について述べている。また、ディーゼル機関における NO_x 低減手法、NO_x 測定方法、ならびにそれらの研究動向を紹介している。

第 2 章では、非定常噴流拡散火炎先端部で NO_x 生成が盛んとなる可能性があることを、非定常噴流火炎における NO_x 生成メカニズムについて研究を行った関連論文を解析しながら解説を行っている。また、酸・塩基性溶液の中和反応を用いて噴流拡散過程における反応領域の可視化観察を行い、類似した構造を持つと考えられる非定常噴流拡散火炎の先端部構造について解析を行った。その結果、実燃焼現象に比べて時間スケールを拡大した細部構造の観察が可能となり、非定常噴流先端部と噴射終了後の

噴流尾部において化学反応が盛んな領域が広く分布することを示している。

第3章では、非定常噴流拡散火炎の噴射期間とNO_x生成量の関連について、実験および数値シミュレーションの両面から解析を行った結果について記述している。まず密閉容器内で噴射期間を種々変化させた燃焼を行い、反応により生成するNO_x量の変化を計測する実験を行った。その結果、上記仮説に対応して、噴射期間の増加に伴い単位燃料当たりのNO_x生成量が増加し、ピークを示した後、減少する傾向が確認された。しかし、この変化は第2章で推定した曲線に比べて極わずかであり、その理由について考察するために、実験では計測が困難な燃焼過程中のNO生成量に関して数値計算を行った。その結果、非定常性の強い非定常噴流拡散火炎先端部でNO_x生成量が顕著に増加していることが確認されたほか、実験結果は初期に形成された多量のNO_xが解析結果に強く影響するために仮説のような際立った変化が見られなかったことを明らかにした。さらに、非定常噴流拡散火炎先端部でNO生成が盛んであることを直接計測する目的で、非定常噴流火炎中の発光スペクトル計測を行った。その結果、噴射直後の火炎先端部でNO発光スペクトル強度が顕著に高く、連続噴射により形成される定常火炎中のNO発光スペクトルはそれに比べてわずかであることが確認された。また、OHラジカルの発光分布変化からも非定常状態では定常火炎長さを超えて下流まで燃焼反応が継続する様子が確認され、噴流先端部の拡散混合が定常噴流火炎に比べて弱いことが確認された。

第4章では、これまでに得られた知見を基に、ディーゼル燃焼におけるNO_x低減の具体的手法について検討を行い、その一つとして、不活性ガスの先立ち噴射による火炎先端部の混合促進効果について実験を行っている。その結果、先立ち噴射によりNO_x生成量を減少させることが可能であることが明らかとなり、これまで燃焼温度や局所当量比の制御が主体であったNO_x低減法について、混合促進によるNO_x低減といった新たな手法の提案を行った。

第5章は、本研究の結論であり、得られた結果の概要を総括している。

これを要するに、著者は非定常噴流拡散火炎において火炎先端部にある非定常領域が主たるNO_x生成領域であることを明らかにするとともに、噴流火炎先端部の混合促進がNO_x低減に有効であることを実証し、従来と大きく異なったNO_x低減法の提案を行っており、内燃機関工学および燃焼工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。