

学 位 論 文 題 名

ディーゼル噴霧内の不均一構造と
拡散混合過程に関する研究

学位論文内容の要旨

拡散燃焼は燃料と周囲空気との混合拡散に主として律速されており、よりクリーンで高効率な燃焼を行うためには、この混合拡散過程の解明が必要である。本研究では、代表的な拡散燃焼であるディーゼル燃焼において、噴霧内のより微細な燃料分布や渦構造を解析することを目的として、混合現象を支配するパラメータの解析、不均一構造の解析手法の提案、噴流および噴霧内の構造解析、拡散速度を変化させた際の火炎の生成過程への影響について解析を行った。

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、本研究の目的及び得られた結果の概要について論述した。

第2章では混合速度に影響を及ぼすパラメータについて解析した。まず、流体塊の拡散速度に影響を及ぼす因子を次元解析した。その結果、拡散式の次元解析から拡散速度は渦エネルギーの平方根と渦スケールの積に比例するものと予測された。ただし、拡散の対象となる流体塊スケールより大きなスケールの渦は平均流とみなせるため除外した。

次に上記の次元解析の予測についてその妥当性を検証する目的で離散渦法による数値解析と同軸噴流装置による実験を行った。離散渦法による数値解析では同一エネルギー条件のもとで流体塊を模擬したトレーサー内に種々のスケールの渦を配置し、渦スケールの影響について検討を行った。その結果、渦スケールが大きくなるにしたがって拡散速度が増加しており次元解析による予測と一致した。ただし、細部では大きなスケールにおいてトレーサーの凝集現象がおき、均一な混合になっていないが、これは極微小な渦や分子拡散の効果をシミュレーションに含まなかったことが原因と考えられる。

また、格子乱流中における流体の混合実験を行った結果、渦のエネルギーの平方根とスケールに関するパラメータの積が増加するにしたがって、拡散速度が増大する結果となっており、実験においても次元解析による予測と一致した結果を観察することができた。

第3章では不均一性の定量解析法について提案を行っている。拡散燃焼を律速する燃料と空気との混合速度について解析を進める上で、その混合状態を定量的に表す必要があるが、今のところそういった指標は提案されていない。そこで、統計力学的エントロピー

法を用いて均一性の定量化法の提案を行い、従来使用されていたフーリエ解析法や確率密度関数 (PDF) 法との比較を行いその有用性を検証した。その結果フーリエ解析法やPDF法では不均一状態の傾向を示すことはできるものの、単一のスカラー量で表現することができず、また多数の時系列データを必要とするため今回の解析には適していない。これに対して、エントロピーはスカラー量で不均一状態を表現することができるため、その有用性が確認できた。また、エントロピーが不均一状態を表していることから、その時間変化を解析することで分子拡散と同様に扱った際の拡散係数を求められる手法を提案した。さらに画像をあるスケールのウィンドウでスキャンしながらエントロピーを計算することで、不均一な流体塊のスケールや個数、不均一な度合いを計算する手法を提案した。

以上のことから噴霧内における燃料塊と周囲空気との混合状態を考察することが可能となった。

第4章では噴霧内への空気導入過程を明らかにするため、噴霧の内部構造をエントロピー法を用いて、特に流体塊のスケールに着目して解析を行った。解析には撮影の容易な液-液噴流と定容容器による高温高圧場における噴霧の画像を使用した。

まず撮影の容易な液-液噴流の拡散構造を解析した結果、ノズル近傍から下流に移動するにつれて流体塊がいったん様々なスケールに細分化され、その後小さなスケールから拡散が進む様子が確認でき、大きなスケールの流体塊が下流部に残留した。また、エントロピー変化をラグランジェ的に追跡することで得られるエントロピー変化のパターンの分布から、同様なパターンのエントロピー変化を示す領域がクラスター上に分布しており、その形状は渦度分布とよく対応していることが明らかとなった。

定容容器を用いて高圧雰囲気中に噴射した液体噴霧の観察を行ったところ、液-液噴流で観察されたと同様にノズル近傍から下流に移動するにつれて流体塊がいったん様々なスケールのものへ細分化され、その後急速に混合が進むことが明らかとなった。また、小さなスケールの拡散速度は下流に行くにつれて徐々に減少するのに対して、比較的大きなスケールでは噴霧境界に見られる大規模な渦構造に対応した間欠的な拡散速度分布となることが認められた。

壁面衝突をとまなう噴流について液-液噴流実験を行ったところ、壁面衝突噴流と自由噴流の間には大きな違いは見られず、壁面に衝突による拡散の促進効果は小さいと考えられることが明らかとなった。

第5章では拡散燃焼において燃料と周囲空気との混合速度が火炎の生成に与える影響について解析を行った。実験には定容容器を用いた可視化画像を使用し、混合速度を変化させるため、燃焼火炎に攪乱流を衝突させた。その結果、攪乱流の有無にかかわらず、いずれの場合も一度様々なスケールの火炎塊が増加しその後急速に消滅していた。特に攪乱流が与えられた場合には、その増加し始める時間および減少し始める時間が早まっており、空気と混合する作用が大きくなることで火炎生成速度が増加していることがわかった。また、攪乱流を与えた場合でも、その効果があまりない条件においては燃焼後期に大きなスケールの火炎が残っており、このスケールの火炎の停滞がすすを生成している

と考えられる。

以上のことから大きく鮮明な流体塊をより急速に減少させる条件を与えることで、燃焼改善効果をより大きくすることができることが明らかとなった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 菱 沼 孝 夫

副 査 教 授 宮 本 登

副 査 教 授 池 川 昌 弘

副 査 助 教 授 近 久 武 美

学 位 論 文 題 名

ディーゼル噴霧内の不均一構造と 拡散混合過程に関する研究

ディーゼル機関はガソリン機関に比較して熱効率に優れているが燃焼過程で発生する黒煙、 NO_x が多いため、利用範囲が拡大されない。地球温暖化防止のための炭酸ガスの削減において、効率の良いディーゼル機関を利用することは望ましいことであり、そのためにはさらにクリーンな燃焼が必要である。ディーゼル燃焼ではシリンダ内の高圧空気中に燃料が微細な液滴となって噴霧され、混合し、着火燃焼する拡散燃焼であり、燃料と周囲空気との混合拡散過程が NO_x および黒煙の生成を左右するため多くの研究が行われているが、混合拡散過程におけるその程度を表す不均一性が定量的に取扱われた例はなく、燃焼改善のための指標が不明確である。本論文では燃料の混合拡散過程における不均一性、燃料塊のスケールの定量的評価法として新たな視点から不均一性の定量解析法を提案している。本論文の成果は次の点に要約される。

- (1) 混合拡散過程で発生する不均一性の解析手法として統計熱力学的エントロピー概念に基づく定量解析法を提案し、燃料と周囲空気との混合状態を定量的に表現できることを明らかにしている。従来から提案されている画像輝度分布のフーリエおよび確率密度解析による評価法と比較し、新たに提案した方法では単一スカラー量で不均一性を直接表すことが出来、不均一な流体塊のスケールや、個数、不均一度合い、エントロピーの時間的变化を解析することによる拡散係数を求める手法を提案している。
- (2) 液-液噴流、定容容器における燃料噴霧試験から得られた画像を使用し、エントロピーによる不均一性の解析を行った所、ノズル近傍から下流に移動するに従い、流体塊が様々なスケールに細分化され、その後小さなスケールから拡散が進み、大きなスケールの流体塊は保存される。又壁面衝突についても解析を進め、壁面衝突による拡散の促進効果は小さいと結論している。更にエントロピー

変化分布を求め、PIV 解析結果による渦度分布と対比した結果、その分布形状はよく対応していることを明らかにしている。

- (3) 拡散燃焼場において燃料と周囲空気との混合速度が燃焼速度に与える影響について明らかにするため、燃焼火炎に高速気流を衝突させた所、様々なスケールの火炎塊が発生し、その後急速に減少することから、空気との急速混合が燃焼速度を促進していることを見出している。

これを要するに、著者は、ディーゼル燃焼において、拡散燃焼における燃料と空気の拡散混合過程について、統計力学的エントロピー概念に基づく不均一性の定量解析法を新たに提案し、実証したものであり、実用上の課題についてもディーゼル機関のクリーン燃焼に一つの指針を与え、将来の燃焼工学および内燃機関工学に対して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あるものと認める。