

## 学位論文題名

ディーゼル燃焼の相似性に関する  
実験的考察と三次元シミュレーション

## 学位論文内容の要旨

本研究は、近久らによって提唱されたディーゼル燃焼の相似理論の精度について明らかにするほか、その適用条件を明確にすることを目的として、実験ならびに数値シミュレーションによる検証を行ったものである。さらに、同理論は単に燃焼の相似性ととどまっていたのに対し、本研究では模型実験データから相似機関のNO<sub>x</sub>排出量を予測する手法について新たに提案する一方、その適用性についても実験による解析を行った。

まず模型実験によるNO<sub>x</sub>の排出予測に関して、近久らによる相似理論では混合律則を適用できることが条件であり、NO<sub>x</sub>等の燃焼生成物は化学反応速度により律則されているため、NO<sub>x</sub>の予測法には言及していない。これに対して、本研究においてNOの生成シミュレーションを行った結果、初期当量比と温度が一定に保たれるならばNOの生成速度は反応期間中ほぼ一定となる性質を持つことが明らかになった。このNOの特性と相似理論による燃焼特性との関係から、異なったサイズの相似機関ではNO濃度が機関回転速度に反比例するものと予測された。そこで実機において相似機関のNO排出量を比較した結果、本予測値と実験値は良く一致することが確認された。

次に相似理論の検証を行うにあたり、ディーゼル燃焼の基本要素である噴霧を対象とし、静止気体中に噴射した液体噴霧火炎と気体噴流火炎の相似性について解析を行った。これは、実機による詳細実験が困難であることと、基礎的な噴霧火炎においてまず燃焼の相似性が成立していることが前提と考えたことによるものである。相似理論ではディーゼル噴霧燃焼のような微細な液滴の蒸発は極めて早く、気体噴流と同じように扱うことができることと、その燃焼は混合律則で進行することを基本仮定に置いているので、この点に特に着目し、燃焼を左右する空気導入特性に関連の強い到達距離・広がり角のほか、内部構造としての速度分布ならびに過度分布の比較を行った。その結果、周囲温度・燃料温度・周囲圧力などが上昇するにつれ、液体噴霧と気体噴流は互いに類似してくることが明らかになった。

一方、相似理論の妥当性を検証することを目的として、三次元数値シミュレーションによる数値実験を行った。計算の実行に先立ってシミュレーション法自体の精度ならびに特性に関して詳細な検討を行なった。その結果、非蒸発噴霧では噴霧抗力係数や初期粒径、噴霧角を調整することにより、実験値と一致した噴霧のシミュレーションが可能であることが明らかとなった。しかし、蒸発の速い気体噴流に近い条件ではそうした調整では十分に現象をシミュレートすることができず、次に実用範囲のメッシュサイズおよびパーセル数で良好な計算結果を得るための計算手法について検討を行った。これにより修正したモデルを用いて、異なったサイズの相似機関を対象として、燃焼の数値実験による比較を行った。その結果、燃焼の相似性に関して近久らが予測したように気体流動や燃焼パターン、ならびに温度の空間的・時間的分布が、相似機関の間で良好に対応することが確認された。ただし、スワール強度に関しては、近久らの予測と異なり、大型機関ほどスワール比を低めに設定するほうが相似性が良好となることが明らかとなった。

最後に、サイズの異なる相似条件を満足した実機関のデータを収集し、比較を行った。実験は、ボアサイズが85-125、260-400、および600-800mmの3群に分かれた全8個のエンジンに対するデータにより行った。これらはそれぞれ、小型4サイクル、中型4サイクル、および大型4サイクルに分類される機関群である。比較の結果、いずれも多少のばらつきはあるものの、数値実験と同様にサイズの異なる相似機関の間で燃焼の相似性が成立することが認められた。また、この場合にもサイズが大きな機関ではスワール比を低

めに設定した際に、より良好な相似性が確認された。また、本研究において提唱したNO<sub>x</sub>の予測法に関しても、実験と良く対応していることが確認された。

以上、本研究で得られた成果を要約すると以下の通りである。

- 1) NOの生成特性と燃焼の相似性から相似機関のNO生成量の予測について、新たに提案を行った。それによると、相似機関のNO排出量は機関回転数に反比例することが予測された。また、模型実験による予測値と実験結果とを比較した結果、いずれも予測値と良好に一致した傾向が示された。
- 2) ディーゼル燃焼の基本要素である噴霧を対象とし、静止気体中に噴射された液体噴霧火炎と気体噴流火炎の相似性について解析を行った。その結果、周囲温度・燃料温度・周囲圧力などが上昇するにつれ、気体噴流との相似性がより良好となることが明らかになった。
- 3) 噴霧燃焼に関する数値シミュレーションの基本特性について詳細な解析を行い、その問題点を明らかにした。また、実用範囲の計算メッシュ条件で良好な計算結果を得るための手法について提案を行った。
- 4) 相似性に関して、実機および数値実験により理論予測の検証を行った。その結果、理論予測と同様に異なったサイズの機関の間で燃焼の相似性が確認された。ただし、スワール比は理論予測と異なり、大型機関のスワール比を小型機関の値よりも低めに設定したほうが相似性が良好となることが明らかとなった。また、噴霧の蒸発性の悪い条件では、相似性が低下することも確認された。

なお、以上の記述に当たり、論文を7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、ディーゼル燃焼の相似性に関する研究動向、ディーゼル燃焼の基礎となる噴霧と噴流に関する研究動向、およびディーゼル燃焼に関する三次元数値シミュレーションの研究動向についてとりまとめた。

第2章では、ディーゼル燃焼の相似性に関する理論の概要ならびに実用機への適用条件について概説した後、同理論の課題について整理した。また、相似理論が燃焼のみにとどまっていたのに対して、本研究において新たにNO排出量の予測について提案を行ったので、その理論的展開について論述した。これはNOの反応計算より明らかになったNOの生成特性と燃焼の相似性に基づいて、相似機関のNOを予測できることを論述したものであり、相似機関のNO排出量は機関回転数に反比例することを示している。

第3章では、ディーゼル燃焼の基本要素である噴霧を対象とし、静止気体中に噴射した液体噴霧火炎と気体噴流火炎の相似性について解析を行った。ここでは、空気導入特性に関連の強い到達距離・広がり角のほか、内部構造としての速度分布ならびに渦度分布の比較を行った。その結果、周囲温度・燃料温度・周囲圧力などが上昇するにつれ、気体噴流との相似性が增大することを示した。

第4章では、内燃機関における噴霧燃焼シミュレーションに用いられているDDM法(Discrete Droplet Model法)について、噴霧モデルの基本特性に関する検討を行った結果について論述した。その結果、計算結果はメッシュサイズに強く依存し、速度勾配の強い噴霧では極端に小さなメッシュサイズが必要なことを明らかにした。ただし、実用範囲内の比較的大きなメッシュを用いる場合には、噴霧抗力係数や初期粒径および噴霧角を調整することにより、実験結果と擬似的に一致した噴霧シミュレーションが可能となることを示した。

第5章では、DDM法による蒸発速度を任意に調整できるように修正したガスジェットモデルを作成し、前章と同様な検討を行うとともに、実用範囲のメッシュサイズおよびパーセル数で良好な結果を得るための計算手法について、併せて検討を行った。その結果、蒸発の速い気体噴流に近い条件では、非蒸発噴霧に対するような噴霧抗力係数や初期粒径および噴霧角の調整では不十分であることを明らかにした。また、非蒸発噴霧の場合以上にメッシュ依存性が強く、実用範囲内のメッシュサイズ条件では十分なシミュレーションが難しいことを明らかにした。そこで、実用サイズのメッシュで擬似的に実験と類似した計算を行うための手法として、非燃料パーセルの先立ち噴射を行う手法について記述を行った。

第6章では、第4、5章において改良を行った噴霧モデルを用いた数値シミュレーションと大型実機エンジンの実験データを用いて、ディーゼル燃焼の相似理論およびNOの排出量予測法の精度検討ならびに適用条件の解析を行った結果について論述した。数値計算および実機を用いた実験の結果、ボアが85mmから800mmまで変化するいくつかの組合せの相似機関の間で、相似理論による予測と同様に相似的な燃焼が得られることを示した。一方、本研究において提案した相似機関のNO排出量の予測においても、実測値と良

く一致することについても記述した。

第7章は、本研究の結論であり、得られた成果の概要を記述した。

# 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 福 迫 尚一郎  
副 査 教 授 伊 藤 献 一  
副 査 助 教 授 近 久 武 美

学 位 論 文 題 名

## ディーゼル燃焼の相似性に関する 実験的考察と三次元シミュレーション

燃焼の相似性に関しては質量，運動量，および熱拡散の面からの無次元整理が行われているが、現象の複雑さから、実際の燃焼器の相似性を論じた例は少ない。噴霧燃焼に基づくディーゼルエンジンは高効率熱機関であることから、小型から大型まで汎用，自動車，車両，船用などに社会的にも幅広く使用されているが、近年排気ガス規制が一段と厳しくなり、さらに高度な燃焼制御や燃焼室の設計が必要であり、新たにディーゼル機関を開発する際、相似性の検討は重要な課題である。

本論文はディーゼル燃焼の基本である噴霧燃焼について実験と数値シミュレーションにより系統的に解析し、ディーゼルエンジンの相似理論の確立を目的として行った研究をまとめたものである。その成果は以下のように要約される。

- 1) 拡大 Zeldvich 反応に混合特性時間を考慮し解析した結果、ディーゼル燃焼における局所的な温度ならびに空気過剰率の相似な機関では  $\text{NO}_x$  生成は機関回転速度に反比例する事を明らかにし、実際のディーゼル機関でこれを実証している。
- 2) ディーゼル燃焼の基本要素である噴霧を対象とし、実験で静止気体中に噴射した液体噴霧火炎と気体噴流火炎の相似性を検討した。周囲温度，燃料温度，周囲圧力が高くなるに従い燃料の蒸発が早くなり、噴霧，噴流の到達距離は相似に、広がり角は一致することを明らかにしている。
- 3) KIVA II プログラムにより DDM(Discrete Droplet Model)法による噴霧の数値シミュレーションを行った結果、実用メッシュサイズで実験値をシミュレーション出来る手法を明らかにしている。さらに、ディーゼル燃焼は混合律速であると仮定し、ガスジェットモデルを考案し、噴流と空気との運動量交換が早い条件下で実験値を推算している。

4) ガスジェットモデルによるディーゼル燃焼の数値実験結果、気体流動や、燃焼パターンならびに温度の空間的・時間的分布が相似機関の間で一致することを明らかにしている。但し大型機関ほどスワール比を低く設定することが必要であることを見出している。さらにボアサイズが 85 - 125, 269 - 400, および 600 - 800mm の 3 群に分かれた全 8 個の実機関に関する相似性の検討を行い、数値実験と同様にサイズの異なるディーゼル機関の間で燃焼の相似性が成立することを明らかにしている。

以上の結果を踏まえ、ディーゼル燃焼の相似性について解析し、三次元数値シミュレーションと実機関の測定結果からディーゼル燃焼に相似性が存在すると結論している。

これを要するに、著者はディーゼル燃焼の基本である噴流・噴霧燃焼について実験と数値シミュレーションにより系統的に解析し、ディーゼルエンジンの相似性について理論的、実験的な面より新しい提案を行い、実証したものであり、燃焼工学および内燃機関工学の発展に寄与するところ大である。

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。