

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	平岡 賢二
論文題目	低エミッションエンジンの燃焼モデリングに関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、産業用ディーゼルエンジンおよび発電用ガスエンジンを対象とし、数値計算の活用によるエンジン開発の効率化を目指して、過渡運転の性能予測などに役立つ現象論的燃焼モデルの提案、ならびに CFD (数値流体力学) 計算をベースとする燃焼系の最適化手法と新規燃焼法の解析に関わる研究を行った結果をまとめたもので、6章からなっている。</p> <p>第1章では、ディーゼルおよびガスエンジンを取り巻くエネルギー・環境問題の動向、ならびにエンジンの熱効率向上と排出物質低減を目指した最近の研究開発の動向を整理した。これにより、将来のエンジン開発における数値シミュレーションの重要性を示すとともに、現状の燃焼シミュレーション技術の課題を明らかにして本論文で取り組んだ技術的課題と研究の目的を示した。</p> <p>第2章では、ディーゼルエンジンを対象に、過渡運転 (回転速度・負荷の非定常的な変化) における燃料噴射系や吸排気系の制御方法の検討に用いるエンジンシステムシミュレーションの精度向上を目指した燃焼モデルの検討を行った。Musculusらの二次元燃料噴霧モデルの考え方を取り入れ、燃料噴射終了後の噴霧への空気導入速度を合理的に計算できる噴霧サブモデルを構築し、これを組み込んだ現象論的燃焼モデルを考案した。このモデルと運動量理論にもとづく従来の噴霧モデルによる噴霧軸上の当量比分布および当量比の頻度分布を比較し、燃料噴射終了後に噴霧の下流に向かって当量比が高くなるなど、従来モデルで再現できなかった噴射終了後の空気導入を3次元 CFD 計算とほぼ同等に計算できることを示した。また、パイロット・メイン噴射を用いたときの実測熱発生率との比較を行い、回転速度、噴射量の広い範囲で、パイロット噴霧の熱発生率や燃焼後期の熱発生率の減衰について実測の傾向を良く再現することを示した。さらに、このモデルをエンジンシステム計算に組み込み、負荷急変時の回転速度追従性を改善する燃料噴射条件および過給機制御方法を明らかにした。</p> <p>第3章では、副室式希薄燃焼天然ガスエンジンの新たな現象論的燃焼モデルを提案した。まず、実測の主室・副室熱発生率と、3次元 CFD シミュレーションによる火炎発達の情報に合わせて、天然ガス混合気の熱発生過程を、三つの段階、すなわち、①副室から主室へ流出する噴流火炎への混合気導入による燃焼、②主室内での火炎伝播による燃焼、③主室内での火炎干渉、に分類した。また、上記①の過程</p>			

を broken reaction zone, ②を thin reaction zone に該当するとし, ①から②への移行が第二カルロピッツ数により判断できるとして燃焼モデルの定式化を行った. このモデルを用いて計算した主室および副室内の熱発生率を実測の結果と比較し, 点火時期, 吸気温度, ならびにメタン価を変化させたときの熱発生率経過が精度良く再現・予測できることを示した.

第 4 章では, ディーゼルエンジンにおいて, 燃焼室形状, スワール比, 燃料噴射弁仕様, 燃料噴射パターンなどの燃焼設計パラメータの最適化を実機試験に代わり数値計算を活用して効率化する方法を検討した. ここでは, 数値計算の簡略化に頼らないで最適化に要する時間を短縮することを主な目的とし, 次に示す方法を考案した. すなわち, まず, 詳細化学反応を考慮した三次元燃焼シミュレーションコードにより, 実験計画法にもとづいた直交表に従う計算を行い, これをもとに応答曲面を作成する. 次に, 作成した応答曲面を用いて焼きなまし法により最適なパラメータを見出す. 得られたパラメータに対して, 再度燃焼シミュレーションを行い応答曲面を修正する. この方法を用いて, NO_x (窒素酸化物) およびすすの排出量を目的関数とする 13 パラメータの最適化計算を行い, NO_x については再現精度が良いが, すすについては特に低排出量するとき誤差が大きいことを明らかにした. さらに, 目的関数をすす排出量のみとして燃焼室形状 (7 パラメータ) の最適化を行い, 従来の計算に比べて大幅な時間短縮を実現しつつ, ベース形状に対して NO_x 排出量を 12%, すす排出量を 55%低減できる形状を見出した. この形状は, 大きいキャピティ, リエントラント型などの特徴を持つ.

第 5 章では, 天然ガスを予混合吸気し, 軽油を噴射し着火源とするエンジンについて, 低エミッション・高熱効率の RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) 燃焼が成立する条件を求めた. まず, 試験機関を用いて, 中程度の負荷 (正味平均有効圧力 BMEP 0.55MPa) において, 低 NO_x, 低黒煙濃度で高い熱効率が得られる軽油噴射時期と天然ガス供給割合の組み合わせを求めたのち, CFD 計算により, そのときの混合気分布の特徴を明らかにした. さらに, CFD 計算の結果をもとに, 軽油噴射時期および天然ガス供給割合に対する混合進行変数と最大軽油モル分率の変化を整理し, RCCI 燃焼が成立するためのこれらパラメータの範囲を定めた. このようにして得たクライテリアを用い, 高負荷 (BMEP 1.1MPa) において RCCI 燃焼を実現する天然ガス割合と軽油噴射時期の範囲を明らかにし, RCCI 燃焼成立領域マップに纏めた.

第 6 章は結論であり, 本論文で得られた結論を整理するとともに, 今後の課題について述べている.

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、産業用ディーゼルエンジンおよび発電用ガスエンジンを対象とし、過渡運転の性能予測などに役立つ現象論的燃焼モデルの提案、ならびに CFD (数値流体力学) 計算をベースとする燃焼系の最適化手法と新規燃焼法の解析に関わる研究を行っており、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. ディーゼルエンジンを対象に、燃料噴射終了後の噴霧への空気導入速度を合理的に計算できる非定常噴霧サブモデルを組み込んだ現象論的燃焼モデルを考案し、多段噴射を伴う熱発生率が従来法より実測に近づくことを示した。また、このモデルをエンジンシステム計算に組み込み、負荷急変時の回転速度追従性を改善する燃料噴射および過給機制御法を提案した。
2. 副室式ガスエンジンの新たな現象論的燃焼モデルを考案した。主室内の希薄予混合気が、副室から流入する噴流火炎に導入され発熱する燃焼形態から、火炎伝播による燃焼へ移行する条件を第二カルロピッツ数により判断する方法を提案し、実測の副室および主室の熱発生率経過を良く再現・予測できることを示した。
3. ディーゼルエンジンにおいて、数値計算による燃焼系設定の最適化に要する時間を、計算の簡略化に頼ることなく短縮するため、実験計画法にもとづいてパラメータを設定した CFD 計算の結果を用いて作成した応答曲面に対し焼きなまし法を適用するとともに、応答曲面の修正過程を加えた手法を提案し、これを燃焼室形状の最適化に適用して短時間で低 NO_x・低黒煙排出となる形状を見出した。
4. 天然ガスを予混合吸気し、軽油を噴射し着火させるエンジンについて、実測と CFD 計算により、混合進行変数と最大軽油モル分率を指標とし、低エミッション・高熱効率の RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) 燃焼が成立するための条件を求めた。このようにして求めたクライテリアを高負荷運転に適用し、RCCI 燃焼を実現する天然ガス供給割合と軽油噴射時期の範囲を明らかにした。

以上、本論文は、数値計算の活用によるエンジン開発の効率化に必要な燃焼モデルの構築と燃焼系諸元・運転変数の選択手法について論じたもので、得られた成果は学術上、實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 30 年 2 月 19 日に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。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 1 4 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降