



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ディーゼル燃焼の着火遅れ特性および予測モデルに関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	坂根, 悠平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15360号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89517
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yuhei_Sakane_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 坂根 悠平

学 位 論 文 題 名

ディーゼル燃焼の着火遅れ特性および予測モデルに関する研究
(A Study on Ignition Delay Characteristics and Prediction Models of Diesel Combustion)

内燃機関は現代社会に幅広く普及している一方、二酸化炭素を含む排出ガスの低減が課題とされている。それに対して電気自動車の普及促進が図られてはいるものの、現状の電源構成や運用環境を鑑みると、当面はハイブリッド車を含めて内燃機関を適材適所に利用することが二酸化炭素削減に対する現実的最適解として考えられる。したがって、高熱効率かつ高出力性能を有するディーゼルエンジンの特性をさらに向上させることが期待される。

最新のディーゼルエンジンでは、熱効率向上と排出ガス低減の両立可能な低温希薄燃焼が実用化されつつある。この低温希薄燃焼は着火遅れを適切に確保する必要があるのに対して、着火特性が運転条件や燃料性状に強く影響を受けることから、ロバスト性の担保とともに膨大な運転条件をともなう自動車や同一機種で多仕様展開を行う産業用エンジンにおける適合工程において多大な工数を要することが課題となっている。これらの課題に対して現象論的解釈に基づくモデルベース適合・制御が提唱されてはいるものの、現在主流となっている運転条件を網羅するマップ制御において、燃焼様態および使用燃料に対応したより正確で簡便な着火特性の予測手法が求められている。そこで本研究では、最新の燃焼システムを有する直噴ディーゼルエンジンを用い、広範な運転条件における着火遅れデータを取得して各因子による影響に対する独立した記述を試みるとともに、得られたデータに現象論的解釈を加えた統計学的手法による着火遅れ予測式の構築を試みた。本論文は全六章から構成されており、その概要は以下のとおりである。

第一章は序論であり、ディーゼル燃焼とその着火現象、および本研究において対象とする着火遅れ予測に関する研究動向を過去に提唱されたモデルを含めて概説するとともに、本研究の目的および本論文の構成を記している。

第二章では、本研究に用いた実験装置および機関性能・特性の計測と解析方法について詳述している。

第三章では、機関回転速度、吸気圧力、吸気温度、排気再循環 (EGR) による吸気酸素濃度、燃料噴射圧力、および冷却水温度の六つの運転条件を最新のディーゼルエンジンにおいて想定される範囲で広範に設定・変更して着火遅れを計測し、得られたデータをもとに着火遅れに及ぼす個々の運転条件による影響に対する独立した記述を試みた結果について述べている。

機関回転速度の増加による着火遅れの減少は、筒内流動の増加よりも圧縮行程における冷却熱量の減少による筒内温度および圧力の上昇が支配的に影響していること、および吸気圧力の高圧化は圧縮端圧力を高めることで着火遅れの減少をもたらす、その寄与度は低機関回転速度時ほど高いことが明らかとなった。さらに、吸気温度の高温化にともなう着火遅れの減少は低吸気温度条件ほど顕著であり、この際、吸気温度差は圧縮行程により増幅された圧縮端温度差をもたらすが、低吸気温度条件ほど冷却熱量が減少してその増幅比が大きくなることが原因として挙げられた。

EGR による吸気酸素濃度の低下により着火遅れは著しく増加し、その程度は低吸気酸素濃度ほど顕著であった。なお、この着火遅れの増加には、燃料と酸素の遭遇頻度の減少に加えて、寄与度は低いながらも筒内ガスの比熱比が減少して圧縮端の筒内温度が低下することも相乗的に作用している。

燃料噴射圧力の上昇にともなって、噴霧液柱分裂時間が短縮するとともに混合気形成が促進されて着火遅れは短縮し、本研究の範囲ではおおむね燃料噴射圧力の 0.3 乗に反比例して減少した。

冷却水温度の低下にともなって、燃料噴射開始時の平均筒内ガス温度が低下して着火遅れが増加するが、低冷却水温度時ではその低下による平均筒内ガス温度の変化が小さいにもかかわらず着火遅れが顕著に増加すること

から、壁面温度が強く影響を及ぼすことが示唆された。

第四章では、着火性が異なる二種類のパラフィン系合成燃料を混合して得られる種々のセタン価を有する燃料を用い、各燃料に対して吸気圧力、吸気温度、吸気酸素濃度、および燃料噴射圧力の五条件を広範に設定することで、着火遅れの運転条件依存性に対して及ぼすセタン価の影響を検討した結果について述べている。

吸気圧力および温度が着火遅れに及ぼす影響のセタン価に対する依存性は基本的に同様であり、いずれの吸気圧力および温度でもセタン価 45 までの低下による着火遅れの増加は小さいのに対して、セタン価を 32 まで低下させた際に着火遅れが顕著に増加した。さらに、セタン価の低下にともなう着火遅れの増加の程度は低吸気酸素濃度条件ほど顕著であり、セタン価を 32 まで低下させた際は低吸気酸素濃度条件においても着火遅れは顕著に増加した。一方、燃料噴射圧力の上昇にともなう着火遅れの減少はいずれのセタン価においても同程度であり、燃料噴射圧力が着火遅れに及ぼす影響のセタン価に対する依存性は小さいことが明らかとなった。

第五章では、前章までに得られた着火遅れデータに基づき、燃焼様態および使用燃料を問わない着火遅れ予測式の構築を試みた結果について述べている。

まず、吸気酸素濃度、燃料噴射開始時の筒内圧力（あるいは酸素分圧）および平均筒内ガス温度を説明変数とした重回帰分析により、アレニウス型着火遅れ予測式を求めた。さらに、説明変数に燃料噴射圧力を追加することで予測精度を大幅に向上でき、高精度かつ簡便な着火遅れ予測式を確立した。ここで、燃料着火性の寄与を表現するため、セタン価が回帰式中の活性化エネルギー項にのみに寄与すると仮定して活性化エネルギー項を算出したところ、着火遅れがセタン価に反比例する関数が得られ、着火遅れ予測式中の活性化エネルギー項に得られたセタン価の関数を代入することで着火遅れ予測が可能であることを示した。

つぎに、アレニウス型着火遅れ予測式の一般性を向上させるため、着火遅れを燃料噴霧が液柱分裂時間に代表される物理的期間とそれに続く化学的期間に分け、化学的期間に対して説明変数を過渡的に取り扱って Livengood-Wu 積分を適用したところ、一定の予測精度を有する着火遅れ予測式を得ることができた。さらに、ディーゼル噴霧における着火が噴霧先端で生ずると仮定し、噴霧運動量理論に基づく燃料噴霧先端の酸素分圧と機関回転速度による燃料噴霧内混合強度を説明変数として採用することで、噴霧中における過渡的現象を考慮した高精度・簡便かつ一般性を担保した着火遅れ予測式を確立できた。その際、燃料噴射圧力ごとに重回帰分析を行うことにより予測精度が若干改善することが明らかとなり、燃料噴射圧力が燃料噴霧中の微視的な混合気構造などに及ぼす効果を回帰式中に記述できれば、さらなる精度向上が期待できることが示唆された。

第六章では、本研究で得られた成果を総括している。

以上要するに、ディーゼルエンジンにおける着火遅れに対する種々の運転条件および燃料の着火性の影響を独立して記述するとともに、ディーゼル噴霧中における過渡的現象を考慮した Livengood-Wu 積分型予測式を確立できた。この予測式は、燃焼様態および使用燃料を問わず高精度かつ簡便な着火遅れ予測が可能であり、ディーゼルエンジンのさらなる性能向上の実現と開発負荷の低減に資する成果が得られた。