

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

燃焼制御によるディーゼル排出ガス中の
NO_x 組成の制御法とその活用に関する研究

Study on the Control Methods of NO_x Component
in Diesel Exhaust by Combustion Control and Its Application

申 請 者

高田	圭
Keishi	Takada

機械工学専攻 熱エネルギー変換工学研究

2 0 0 8 年 1 2 月

現在、66 億人を超える人々が地球上で生活し、先進国や工業化が進む国々が多量なエネルギー消費を続けることによる二酸化炭素 (CO_2) の過剰な排出が地球温暖化、およびそれに起因した様々な悪影響を及ぼすことが指摘され、全世界規模で CO_2 排出量を削減することが重要な課題となっている。日本国内においては、運輸部門から全体の 2 割程度に相当する CO_2 が排出されており、その中で自動車占める割合が非常に高くなっている。その自動車から排出される CO_2 の量を削減するための手段として、ガソリンエンジンと比較して熱効率の高いディーゼルエンジンを乗用車用としても普及させることが解決策の一つとなると考えられている。しかしながら、ディーゼルエンジンには、ガソリンエンジンにおける三元触媒のように効果的に有害な排出ガスを低減できる方法が見出されておらず、特に窒素酸化物 (NO_x) と粒子状物質 (PM) の排出量が多いことが課題視されている。燃焼制御技術と排気後処理技術、さらにそれらを十分に機能させるための燃料技術を組み合わせることによって高い効率を維持したまま大幅な低公害化が図られてきているが、未だガソリンエンジンよりも有害成分の排出が多い状況にある。ガソリンエンジンに近い水準の排出ガス規制の施行が予定される中、エンジンシステムから排出される NO_x の排出量の削減が重要な研究課題となっている。PM 削減のために用いられるディーゼルパティキュレートフィルタ (DPF) の PM 浄化性能は高く、エンジンから排出される PM を重量ベースで 99% 程度の高い水準で削減できるのに対し、 NO_x を浄化する触媒は吸蔵還元型触媒、選択還元型触媒共に高い浄化率を実現することが難しく、大幅な低減方法の確立が急務である。本研究では、乗用車用のディーゼルエンジンを供試機関とし、主に大型のディーゼルエンジンにおいて非常に高い NO_x 浄化効率が確認されている Urea-SCR システムを適用して NO_x 低減を図ることを研究目的とする。特に、 NO_x 中の NO_2 割合の変化により浄化性能が大きく変化することから、乗用車でも実現可能な燃焼制御によって NO_x 組成を制御する方法を適用する。 NO_x 組成制御に関する検討には、汎用数値流体解析コードと詳細化学反応計算のカップリングコードを利用した。このような種類の数値解析は、高い予測精度が期待されながらも予測精度が不十分であることが多いため、予測精度の高い数値解析技術を確立することも本研究の目的とするところである。

本論文は 7 章から構成される。第 1 章においては、上に述べたような本研究を行うにあたっての研究背景や目的について述べた。

第 2 章においては、排気後処理装置として適用する Urea-SCR システムの NO_x 浄化特性の調査、および NO_x の組成の変化に対する浄化率の変化について調査した。システム内で生ずる NO_x 還元反応のうち、 NO と NO_2 が等モルで還元剤のアンモニア (NH_3) によって還元される Fast SCR と称される反応が、最も低温から速い反応速度で進行することが明らかである点に着目し、排気管を強力な酸化触媒を通過するラインと酸化触媒をバイパスするラインに分けたレイアウトとすることで、広い運転条件に対して NO_x 浄化率の向上を実現することを狙った。特に、Fast SCR 以外の反応の速度が非常に遅い、触媒温度 450K の条件において本レイアウトの採用による浄化効率の改善が顕著であり、ベースシステムと比較してシステムアウトの NO_x 排出量をおよそ 1/5 にま

で低減することを可能とした．ラインを通過するガスの流量を制御することにより自由に NO_x の組成をコントロール可能であるため，排気が高温となる中・高負荷領域においても同等あるいはベース以上の NO_x 浄化率を達成できた．しかしながら上記の方法は，容易に NO_x の組成をコントロールすることができる反面，装置が大型化してしまう欠点があり，搭載スペースの制約が厳しい乗用車用のシステムとしては実用性がない．そこで燃焼制御による NO_x 組成のコントロール方法について検討した．検討には汎用数値流体コード STAR-CD を用い，詳細な化学反応計算を実施可能な Complex Chemistry Module によってディーゼル燃焼の数値解析を実施した．

第 3 章においては，数値解析を実施するにあたって多次元数値流体シミュレーションと素反応解析のカップリングが広範囲の運転条件において十分な予測精度を示した例がほとんど確認されないことから，数値解析の妥当性を検証した．軽油とセタン価が近いノルマルヘプタンの簡略素反応機構と NO_x の予測に必要な N 系の素反応を組み合わせ 33 種の化学種と 66 本の素反応で構成される反応機構を構築した．参考としたままの反応機構では，実験結果との十分な一致が確認されなかったため，着火に対して大きな感度を持つ素反応式に着目し，アレニウスパラメータを変更することによって予測精度の向上を図った．その結果，燃料噴射時期をパラメータとした 4 条件，EGR 率をパラメータとした 4 条件の合計 8 条件に対して，筒内圧力のピーク圧が $\pm 3\%$ ，ピーク圧を示すタイミング，および圧力上昇を示すタイミングが $\pm 0.1 \text{ ms}$ という非常に高い精度で実験値の再現が可能となった． NO_x 排出量に関しても，EGR を行わない条件に対して定量的，EGR を実施する条件に対しても定性的な傾向を十分に予測可能であることを確認した．

第 4 章では妥当性が確認された数値解析コードにより，燃焼制御に伴う NO_x 排出特性の変化を詳しく解析した．初めに，本数値解析コードを使って，燃焼制御が燃焼特性と NO_x 排出特性に与える影響について解析した．実験では単独で変化させることが困難な吸気圧力，吸気温度といったパラメータを単独で変化させることによって各パラメータの感度を解析した．さらに，EGR の適用によって NO_x が低減するメカニズムについて吸気酸素濃度の低減と EGR ガスの還流による比熱の変化の影響を分離して評価することを目的として，酸素と同じ熱物性値を有するが他の物質と反応しない不活性な酸素として Inert O_2 という化学種を定義し，この化学種で筒内ガスを希釈した際の数値解析を実施した．これらの解析により，膨張行程途中で予混合的に燃焼が生ずるディーゼル燃焼においては，筒内の酸素分圧が熱炎反応の開始時期を決定すること，および EGR による NO_x 低減メカニズムは吸気酸素濃度が低下して NO の生成領域が縮小されることが主であり，EGR ガスの還流による比熱の変化はその NO 生成領域内の NO 濃度を低下させる副次的な効果をもたらすことを明らかにした．

第 5 章では，上記の検討を踏まえて，燃料の多段噴射化が NO_x 組成の変化に及ぼす影響，および組成制御の可能性について調査した．燃焼によって生成した NO と炭化水素 (HC) の分解過程で生ずる HO_2 ラジカルとの反応により NO が NO_2 に酸化される反

応に着目し、早期 Pilot 噴射および Post 噴射を実施することでこの反応の促進を狙った。実機試験の結果、メイン噴射時期と離れたタイミングにて Pilot 噴射および Post 噴射を実施することで NO_x 中の NO₂ の割合を高めることが可能だった。1500 rpm, 1/8 負荷の条件において EGR 無しの条件で 16.6% から 51.4%, EGR 有りの条件で 37.3% から 84.6% の範囲でコントロール可能であった。また、数値解析により筒内における NO-NO₂ 変換反応の挙動に関する計算結果から、Post 噴射をしたケースに関しては数値解析によっても NO₂ 生成量の増加を再現することが可能であり、それはシリンダライナ近傍で、NO-NO₂ 変換反応が活発に生じているためであることが示唆された。

第 6 章ではこれまでの結果を踏まえて、後処理装置に Urea-SCR システムを備えた乗用車用ディーゼルエンジンシステムを用いて、NO_x 生成特性および NO_x 還元特性の調査を実施した。燃料を還元剤として使用しない Urea-SCR システムを NO_x 浄化触媒として採用することによって、ベースシステムと比較して NO_x 浄化性能を低負荷域において同等、中・高負荷域において大幅に改善した上でおよそ 6.5% の燃費の改善効果があることを確認した。また、第 5 章で検討した NO_x 組成のコントロールを適用することによって、1/8 負荷、EGR を適用しない条件において Post 噴射の適用により、触媒温度上昇の効果も含めて 14.8%(point)、触媒温度が同等の条件においても 3.4%(point) の NO_x 浄化率の改善効果を確認した。最後に、多段噴射化、EGR の適用と排気浄化触媒の特性の評価を行い、燃焼制御による NO_x 低減、排気温度の上昇、EGR による動作ガス流量の低減がともに触媒の浄化性能を向上させる側へ作用し、今後も同様の手法を適用することで、さらなる低公害化が促進できる可能性を示した。

第 7 章においては 6 章までの成果を総括し、今後の展望について述べた。

以上、本論文においては乗用車用ディーゼルエンジンからの NO_x 低減を題材に、素反応過程を考慮した多次元数値解析を実施して NO_x 生成挙動について詳しく調査し、Urea-SCR NO_x 還元システムが高い NO_x 浄化性能を発揮できる排気温度、排気組成となるような燃焼制御法について実機試験および数値解析の両面から研究を行った。数値解析においては、予測精度が不十分だと考えられてきた手法による数値解析の予測精度が、燃料噴射時期や EGR 率といった主要なパラメータの変化に対して非常に高い精度となり得ることを示し、さらには実験的手法による確認が極めて困難な、吸気の各パラメータ燃焼過程に及ぼす感度や EGR による NO_x 低減メカニズムに関する詳細な考察が数値解析により比較的簡単に実施できることを証明し、今後の数値解析技術の幅広い利用の可能性を提示した。さらには、大型車や排気量の大きなエンジンを搭載した車両用のアプリケーションと考えられてきた Urea-SCR システムが、より小さい排気量の乗用車用ディーゼル機関においても非常に良好な NO_x 浄化性能および低燃費性能を示し、またその性能が燃料噴射制御の工夫によってさらに高まる可能性を示すことができた。