

外99-18

早稲田大学審査学位論文(博士)の要旨

2988

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

給気条件の最適化による筒内噴射
火花点火方式メタノールエンジン
の高効率化と~~NOx~~低減
排出ガス

Improving Efficiency and NOx Emission
in a Spark-Ignition Methanol Engine
by Optimizing Intake Conditions

申請者

佐藤 由雄
Yoshio Sato

1999年11月

近年、大都市やその周辺地域では、自動車の交通量が増大し、輸送体系のトラックへの依存が拡大する状況にあって、NO_xと浮遊粒子状物質の大気中濃度が環境基準を上回る箇所が増え、沿道住民に深刻な健康被害をもたらしている。また、地球温暖化の防止に関連して抑制が強く求められているCO₂については、自動車排ガスの寄与度が増大しつつある。このような状況にあって、自動車に対しては排出ガス低減とCO₂の排出削減、すなわち燃費向上との両立という二律背反的な課題が課せられている。特に、トラック・バス等のディーゼル車は自動車全体のNO_x排出量のうち約5割を排出し、粒子状物質(PM)は約6割を占めている。なかでも近年、都市内物流に大きな比重を占めつつある積載量2～3トン程度の小型ディーゼルトラックが大幅に増加し、大気環境への悪影響が懸念されている。ディーゼル車に対しては、これまでの数次に及ぶ排出ガス規制の強化により排出ガス低減が段階的に図られてきたが、NO_xとPMは相反する排出特性を持つため、両者の低減はほぼ限界に近づきつつある。また、排出ガスの後処理によるNO_xの低減が期待されているが、触媒に対して黒煙や微粒子の付着・堆積、硫黄酸化物による被毒を引き起こすため、ディーゼル車の大幅な低公害化は極めて困難な状況にある。

このような状況にあって、大都市地域の大気環境改善のためには、ディーゼルエンジンに代わる低公害・高効率小型トラック用エンジンを開発し普及を図ることが強く要望されている。そのようなエンジンの有力候補として、石油代替燃料であるメタノールを用いるエンジンがあり、筒内噴射火花点火方式を採用することにより黒煙を排出せずPMとNO_xを大幅に低減し、高いオクタン価により熱効率の向上を実現しうる可能性がある。この燃焼方式については、これまでにも圧縮比、燃焼室形状、燃料噴射方式、点火方式等の改善に基づく燃焼の最適化が試みられてきた。しかしながら、それらの効果は燃焼室内における空間配置等に強く依存するため低負荷あるいは高負荷の一方においてのみ成立するものが多く、幅広い運転条件において有効性を示した例は見受けられないのが実情である。

そこで本研究では、大都市地域内の物流に多用され、大気環境への悪影響が懸念される小型トラック用のディーゼルエンジンに代わる低公害・代替燃料エンジンとして筒内噴射火花点火方式メタノールエンジンに着目し、実験を通じてその高効率化と大幅な排出ガス低減を図ることを目的とした。このため、メタノールの燃焼と排出ガス特性を支配する燃焼室内の温度、圧力及び混合気濃度に関する運転因子として、エンジン給気の温度、圧力及び組成条件に注目し、その最適化を図ることで新たな燃焼制御方式を提示することをねらいとした。この燃焼方法により、給気の温度、圧力及び組成条件を負荷(噴射量)に応じて制御し、低負荷から高負荷の幅広い運転条件において高効率と低公害化を両立させるための柔軟な燃焼制御を可能にし、従来の研究のように噴射系や燃焼系等の空間配置に依存する必要性を軽減しようとするものである。

実験では、まず各給気条件がエンジン性能及び排出ガス特性に及ぼす影響を調べ、そこで得られた成果に基づき各給気条件を組み合わせて最適化した場合の熱効率向上とNO_x低減の効果を明らかにした。さらに、排出ガス試験を実施して排出ガス規制への適合性を調べるとともに、給気条件の制御システムを最適化して過渡走行運転を含む広範な運転条件における総合的評価を行い、筒内噴射火花点火方式メタノールエンジンの高効率化とNO_x低減における本燃焼方法の有効性を実証するとともに達成可能な燃費と排出ガス性能を明らかにした。

本研究で得られた成果を要約すると以下の通りである。

はじめに、総排気量3.3 lの水冷、4サイクル、4シリンダの直接噴射式ディーゼルエンジンから筒内噴射火花点火方式メタノールエンジンへ転換を図った際の正味熱効率と排出ガスの基本特性を調査した。その結果、低負荷では未燃成分の排出を抑制して正味熱効率を改善し、高負荷では高効率を維持しつつNO_xを大幅に低減する必要があることを見いだした。また、燃焼解析により燃焼基本特性を調べ、燃料噴射量の少ない低負荷では点火プラグ周辺に比較的過濃な混合気を形成すること、また、高負荷では噴射量が多いため空気導入を促進し混合気形成を活発化させることができ燃焼改善を図る上で重要なことを明らかにした。

つぎに、給気加熱、吸気絞り、過給及び排出ガス再循環(EGR)により、給気の温度、圧力及び組成の各条件を操作し、エンジン性能と排出ガス特性に及ぼす影響を調べた結果、以下の知見を得た。

(1)吸気絞りによって給気圧力を適切に低下させると、低負荷から中負荷での範囲では正味熱効率が向上し未燃成分が減少する。給気圧力(密度)の低下は燃料噴霧の到達距離を増し、点火プラグ周辺の混合気濃度を比較的過濃な条件とするため、火花点火の安定化と点火後の燃焼速度の増加をもたらす。その際、吸気絞りによりポンピング損失が増加するが、燃焼改善効果がその増加分を上回るため正味熱効率が向上する。ただし、混合気が全体的に過濃になるためNO_xは増加する。

(2)給気加熱により給気温度を上昇させると、低・中負荷において正味熱効率が向上する。その際、メタノールは自着火しないため、一定の着火遅れ期間が確保されその間に燃料噴霧の蒸発が促進される。また、混合気温度の上昇と希薄燃焼限界の向上により点火性及び燃焼速度が大幅に改善され未燃分が減少する。さらに、給気温度が高いほど燃焼改善効果が増加するため吸気絞りの必要性が低下するが、給気温度の比較的低い条件では吸気絞りを行った方が未燃分の低減効果が大きい。一方、NO_xは給気温度の上昇に伴って増加する。

(3)過給を行い給気温度の上昇を抑えた上で給気圧力を適正化すると、高負荷では正味熱効率が増加しCOが減少する。このような給気圧力(密度)の増加は噴霧の微粒化を促進するが、メタノール燃料では着火遅れ期間の変化が少ないため燃料蒸発が活発化する。また、空気導入も積極的に行われるため熱発生量が増加し燃焼が改善される。その際、混合気の希薄化が促進されるためNO_xは無過給

時と比べて減少する。

(4) EGRを行うと高負荷では不活性ガスの増加により燃焼が悪化するが、低・中負荷では正味熱効率とNO_xが同時に改善される。EGRでは給気の温度上昇と組成変化（酸素濃度の低下と未燃メタノール濃度の増加）が同時に生じるが、給気の温度上昇による燃焼改善効果に未燃メタノールによる燃焼促進効果が加わり、給気酸素濃度が大幅に低下した条件においても燃焼が抑制されないため、正味熱効率を改善しつつ効果的なNO_x低減が可能となる。

つぎに、以上の成果に基づき燃焼の最適化に必要な給気条件の組み合わせに関する正味熱効率と排出ガス特性について詳しく調査した。すなわち、正味熱効率の向上には低負荷において吸気絞りと給気加熱を組み合わせ、高負荷では給気温度の上昇を抑えて過給を行う一方、NO_xの低減には給気酸素濃度を大幅に低減し燃焼温度を低下させることが有効であり、そのためには大量EGRを適用することとした。これに基づき、各負荷条件ごとに給気の温度、圧力及び組成（給気酸素濃度）条件を最適化した結果、最適化前に対して正味熱効率を5%程度向上させ、THCとCOの増加を最小限に抑えつつNO_xを約1/10以下、負荷全域において1.0g/kWh以下にまで低減できることを確認した。

さらに、小型トラックの都市内走行に適した給気条件の過渡制御システムと酸化触媒の有効性について実験的に検討し、制御システムを最適化して排出ガス規制への適合性に関する評価を行った。その結果、最新の排出ガス規制値を下回るとともに、将来予定されている排出ガス規制にも十分適合し得ることを明らかにした。また、実走行に対応した過渡運転条件において燃費及び排出ガス性能に関する総合的評価を実施し、NO_xはベースエンジンに対して約1/3、低速走行時を含めて1.0g/km以下に低減し、給気条件の最適化が実用上有効な燃焼方式になり得ることを実証した。また、直接噴射式ディーゼルエンジンと比較した場合、ほぼ同等の燃費性能を確保しつつ、NO_xを1/4～1/8、COとTHCは酸化触媒が使用できるため約1/4～1/10以下まで低減できることを見いだした。

以上より、給気条件を最適化した筒内噴射火花点火方式メタノールエンジンは都市内で用いられる小型トラック用ディーゼルエンジンに代わる低公害・高効率エンジンとして十分な素質を有していることを明らかにした。

なお、本研究の今後の発展を目指してNO_xの後処理の可能性に関する調査を試みた。ここでは、NO_x選択還元触媒（γ-アルミナ、容量5l）を用い、給気条件を操作して排出ガスの温度、流量及び還元剤である未燃メタノールの濃度がNO_x低減効果に及ぼす影響について調べた。その結果、低負荷から全負荷において20%～60%程度の高い低減効果が認められ、負荷全域で0.5g/kWh以下の極めて低い排出レベルにまでNO_xを低減できることを明らかにした。これにより、筒内噴射火花点火方式メタノールエンジンの一層のNO_x低減の可能性と将来的に厳しい排出ガス規制への適合に対する見通しを示すことができた。