

# 予混合圧縮着火機関における天然ガスおよびメタノールの 着火・燃焼特性に関する研究

生産研究科学科 鄭 爽鎬

21 世紀に入って、人類が緊急に対処すべき課題として、地球温暖化や石油資源枯渇などの地球規模の問題がクローズアップされ、特に、1997 年京都議定書が成立して以来、地球温暖化の主要物質である CO<sub>2</sub> の排出削減が強く要求されている。エネルギーとりわけ化石燃料を効率良く利用することがこれらの問題解決の第一歩であり、現存の原動機単体の中で最高の熱効率を有するディーゼル機関は、将来に亘って主要な動力源として一層活用されるべきである。しかしながら、ディーゼル機関の排気ガス中に含まれる窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) や粒子状排気物質 (PM) が大都市の大気環境を悪化させているのも事実で、排気ガス対策なしではディーゼル機関の利用拡大は望めない。日本のみならず欧米においても、ディーゼル機関から排出される NO<sub>x</sub> と PM の両者に対して、ガソリン機関に対するものと同程度の厳しい排気ガス規制が予定されている。

高い熱効率と低排出ガスの両者を同時に達成する燃焼方法として、ディーゼル機関において燃料混合気の希薄化・均質化が指向されており、均一な予混合気を圧縮自着火させる機関、すなわち均一予混合圧縮着火 (Homogeneous Charge Compression Ignition: HCCI) 機関が将来の燃焼方式として有望視されている。HCCI 機関では、混合気中に過濃部分がないため排煙が発生しないし、均一な燃焼温度場になるので窒素酸化物の発生も低く抑えられる。しかしながら、希薄混合気に基づく失火、未燃炭化水素の多量排出、急激燃焼によるノックの発生などにより、運転できる負荷範囲が限定されて実用機関としての課題が多い。

本論文では、まず、代替燃料である天然ガスあるいはメタノールの均一予混合気を少量の軽油噴霧により着火する軽油着火 2 元燃料ディーゼル機関について、着火特性、燃焼形態、燃焼速度およびノック限界を支配する物理因子を追究した。次いで、天然ガスあるいはメタノールに着火源として高着火性のジメチルエーテル (DME) を混合した均一予混合気の着火特性、燃焼特性、失火特性、ノック限界等について、それぞれの現象を支配する物理因子を追究した。特に後者については、HCCI 機関における低温酸化反応および高温酸化反応に及ぼす燃料セタン価、吸気温度、圧縮比、EGR の影響を明らかにするとともに、特に、EGR に基づくノック抑制効果および熱効率改善効果を解析し、HCCI 機関における EGR の有用性を明らかにしている。また、均一予混合圧縮着火機関の実用化に向けて、単気筒機関および多気筒機関における安定な運転負荷範囲を比較し、不安定な燃焼を引起す要因を明らかにしている。

第 1 章では、本論文の研究の背景、研究の動向、解決されるべき問題点および本論文の目的と構成を述べている。

第 2 章では、燃焼特性の質的評価のための解析方法について述べている。まず、燃焼を評価する基本となる熱発生率の高精度算出方法を述べている。0.25 度毎にサンプルされた 350 サイクルに亘る平均時間履歴圧力データ、およびクランク角度毎の燃焼率から燃焼室内のガス組成、比熱、比熱比および熱発生率を算出し、着火時期を算定した。次いで、クランク角度毎の

ガス定数と状態方程式を用いて筒内ガス温度を算出し、着火温度を算定した。さらに、計測された CO<sub>2</sub> 濃度から EGR 率を算出する方法、ならびに、EGR が熱効率に及ぼす影響を評価するための熱収支算定方法を述べている。

第3章では、HCCI 機関では、2 段発火特性を有する DME を着火源として混合しており、天然ガスやメタノールの高温酸化反応のトリガーとなる DME の前炎反応すなわち低温酸化反応において生成されるホルムアルデヒド、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> および OH ラジカルの影響を評価するため、化学反応機構の概要を述べた。特に、天然ガスおよびメタノールの高温酸化反応を持続するために重要な H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 系の連鎖反応機構について述べている。

第4章では、先ず、本実験で使用した燃料の性状、供試機関、燃料供給システム、EGR システム、排ガス分析システム、燃焼解析システムなどの実験システム、次いで、空気、天然ガスおよびメタノールの流量計測法、さらに、軽油着火 2 元燃料ディーゼル機関および DME 着火による HCCI 機関の燃焼実験方法について述べている。

第5章では、軽油着火 2 元燃料ディーゼル機関に関する実験結果から、天然ガスあるいはメタノールの均一予混合気の最小軽油噴射量換言すれば最小着火エネルギー、ノック限界筒内平均ガス温度および燃焼形態について得られた新しい知見を述べた。(1) ノック限界筒内平均ガス温度は、天然ガスの場合 1600±50[K] であり、メタノールの場合 1450±50[K] である。(2) 筒内平均ガス温度がこの値に到達した場合の燃焼形態は筒内全体が同一位相で燃焼する自発火であり、それより低い温度では多数の軽油噴霧を着火源とする火炎伝播である。

第6章では、DME 着火による天然ガスあるいはメタノール HCCI 機関における低温酸化反応、高温酸化反応およびノック限界負荷に及ぼす DME 当量比、燃料セタン価、吸気温度、圧縮比、EGR および気筒数の影響を個別かつ総合的に追究し、以下の多くの新しい知見を得ている。

(1) HCCI 燃焼の着火温度は、燃料のセタン価のみに依存し、セタン価が低いほど着火温度が高くなる。

(2) HCCI 燃焼の着火時期を支配する DME の低温酸化反応を抑制する効果は、天然ガスよりメタノールが大きい。換言すれば、低温酸化反応抑制効果は燃料のセタン価のみならず分子構造にも依存する。なお、メタノールの場合、低温酸化反応が消滅したにも拘らず高温酸化反応が維持されるセタン価範囲がかなり広い。

(3) HCCI 燃焼における着火源としての DME 当量比が小さいほど最高到達負荷が高くなる。換言すれば、燃焼の中心を代表するクランク角度 CA50 が上死点後に遅延されるほど、最高到達負荷が高くなる。なお、CA50 が上死点後約 10° 以上になると失火に至る。

(4) EGR による HCCI 機関の熱効率の向上は顕著で、EGR 率 50% のとき、広い負荷範囲に亘って約 4% もの熱効率の向上が得られる。

(5) 多量 EGR に基づく HCCI 機関の熱効率の向上は、その大部分が未燃炭化水素の低減、換言すれば燃焼効率の向上に基づくものである。なお、EGR によって高温酸化反応は抑制されるが、最高到達負荷は殆んど変らなかった。

(6) 単気筒 HCCI 機関と多気筒 HCCI 機関における安定な運転負荷範囲を比較したところ、多気筒機関の場合、吸気マニフォールドにおける混合気分配の不均一さではなく、各気筒の冷却の不均一さに基づいて最小 DME 当量比が増加するため、最高到達負荷が僅かに低くなる。

第7章は、本論文全体に亘る総括である。