406 DME / CH₄ 混合燃料を用いた HCCI 機関の燃焼解析

Analysis of Combustion in Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with DME and Methane

○学 西見 涼香 (日大院) 学 野村 広哲 (日大院) 学 武藤 拓也 (日大院)

正 吉田 幸司 (日大) 正 庄司 秀夫 (日大)

Sayaka NISHIMI, Hiroaki NOMURA, Takuya MUTO, Koji YOSHIDA, Hideo SHOJI

Nihon University, 1-8 Surugadai Kanda, Chiyoda-ku Tokyo

Key Words: HCCI, DME, Methane

1. 序 論

環境保全の観点から、窒素酸化物 (NO_x) や粒子状物質 (PM) の同時低減が求められる中、これを可能とする新燃焼方式・予混合圧縮着火 (Homogeneous Charge Compression Ignition, 以下 HCCI) 燃焼⁽¹⁾が注目されている。しかし、着火に至るまでの過程を化学反応に依存しているため着火時期制御が困難であることや、投入熱量を増加させるとノッキングが発生するため運転領域が狭いという問題点がある。本研究では、ディーゼル機関に、圧縮着火機関の代替燃料として注目されているジメチルエーテル (DME) にメタン (CH₄) を添加させた予混合気を供給して HCCI 運転をし、燃焼特性の詳細を考察する。

2. 実験装置および実験方法

供試機関には 4 サイクル空冷単気筒ディーゼル機関を用いた。この供試機関の仕様を表 1 に示す。DME およびメタンは、各マスフローコントローラにより流量制御され、吸気弁より約 1000 mm 上流の予混合装置内に常時投入することで予混合気を形成する。シリンダヘッド上部には、燃焼室内圧力を測定するための水晶圧力変換器と、燃焼室末端部の発光強度を測定するための石英観測窓ホルダを取り付けた。石英観測窓ホルダから採取された火炎光は、コア径 1 mm の光ファイバにより多波長分光器へ導かれ、306.4 nm (OH ラジカルに相当)、395.2 nm (HCHO に相当) の波長に分光する。分光器の波長分解能は、半値幅 4.0 nm である。分光後、各波長は光電子増倍管へと導かれ、その出力電圧を発光強度とした。

供試燃料は、DME を主燃料、メタンを添加剤として用いた。それぞれの物性値を表 2 に示す。DME は、圧縮到達温度が上昇しても着火遅れが短くならない負の温度係数領域を持ち、低温酸化反応 (LTR) および高温酸化反応 (HTR) による多段の熱発生を生じるという特徴をもつ。また、メタンは HTR のみの一段着火を示し、自着火温度が高く、セタン価が 0 である。このため DME とメタンを混合することは着火時期制御に有効である。

Table 1 Specifications of Test Engine

4-Cycle Air-cooled Diesel Engine	
Number of Cylinders	1
Bore×Stroke	76×66 mm
Displacement	299 cm ³
Compression Ratio(DME / methane)	12:1
Valve Arrangement	OHV
Intake Valve Close	ABDC 54 deg.
Exhaust Valve Open	BBDC 56 deg.

本実験は、機関回転数 $N = 1400$ rpm、圧縮比 $\varepsilon = 12$ で行った。そして、DME 単体燃料でノッキングおよび失火を生じず、メタン部分当量比が DME 部分当量比を超えない範囲を運転領域とした。

Fig. 1 Configuration of fuel supply system

Table 2 Properties of Test Fuels

Fuel	DME	Methane
Molecular Formula	CH ₃ OCH ₃	CH ₄
Cetane Number	>55	0
Auto-ignition Temperature [K]	623	905
Low Heat Release Value [MJ/kg]	28.4	50.3
Stoichiometric A/F Ratio [kg/kg]	8.96	16.9

3. 実験結果および考察

図 2 は圧縮比 $\varepsilon = 12$ 、DME 部分当量比 $\phi_{DME} = 0.30$ 一定の下、メタン部分当量比 $\phi_{CH_4} = 0, 0.08, 0.12$ と変化させたときの測定波形である。メタン混合割合の増加に伴い、燃焼室内圧力や熱発生率のピーク時期は共に遅角している。また、HTR の熱発生率最大値は、メタン混合割合が多いほど増加していることがわかる。これは、メタンを増やすことで、1 サイクル当たり投入する DME とメタンの合計投入熱量 $Q_{in} (= Q_{DME} + Q_{CH_4})$ が多くなり、HTR の発熱量が上昇するためだと考えられる。DME のみで投入熱量を増加すると着火時期は早期化⁽²⁾するが、メタンを用いることで、着火時期を早めることなく投入熱量を増加することができた。また、メタン混合割合が多いほど、LTR による熱発生率最大値が低下していることがわかる。

各中間生成物の発光強度波形においても、メタン混合割合の増加に伴い、発光のピーク時期は遅角している。HTR の開始時期の遅角に付随して起こるためと考えられる。そして発光のピーク値は、メタン増加に伴い増加している。これは、

	ε	Q_{in} [J/cycle]	DME ϕ_{DME}	CH4 ϕ_{CH4}
1	12	289	0.30	0
2	12	358	0.30	0.08
3	12	393	0.30	0.12

Fig. 2 DME/methane-HCCI measured waveforms

メタンを添加することにより投入熱量が増加するため、発光強度が増加したものと考えられる。

4. 解析結果

図 3 は、実機における反応過程を推測するため中間生成物のモル分率について素反応数値計算をした結果である。計算に用いたソフトウェアは CHEMKIN 4.0, IC Engine model, 使用したスキームは Curran らの DME モデル⁽³⁾で素反応数 336, 化学種数 78 である。0 次元、断熱条件の下、機関回転数 $N = 1400$ rpm, 圧縮比 $\varepsilon = 12$ とし、DME 単体燃料として $\phi_{DME} = 0.30$ (波形ア), DME / メタン混合燃料として $\phi_{CH4} = 0.04$ (波形イ), 0.08 (波形ウ) について計算を行った。

熱発生率波形より、DME のみの場合 (波形ア) は 2 段の熱発生を、DME にメタン添加した場合 (波形イ, ウ) は 3 段の熱発生を生じていることがわかる。

1 段目の熱発生率部分 (A) に着目すると、熱発生率の増加と共に OH や HCHO が生成され、同時に DME が一部減少していることがわかる。

さらに、DME / メタン混合燃料の熱発生率が縮退する部分 (B) および (B') に注目する。縮退開始と同時にメタンが急激に消費され始め、DME は完全に消費されている。そして OH は、モル分率が一時停滞して再び急激に増加している。これは、メタンを分解する際に、OH を消費するため、OH のモル分率が増加しなくなると考えられる。よって、メタンを混合することで急峻な熱発生を回避することができたと考えられる。そして、メタンの混合割合の増加に伴い、OH 停滞期間が延びていることがわかる。

図 4 は、DME / メタン混合燃料を用いた HCCI 運転での圧縮比 $\varepsilon = 12$ におけるクランク軸出力と、正規で供試機関をディーゼル運転したとき (圧縮比 $\varepsilon = 21$, 燃料: JIS 1 号軽油) のクランク軸出力を示したものである。HCCI 運転では、合計投入熱量 Q_{in} に対するメタンの混合割合を 5%

Fig. 3 Numeric calculation result ($\varepsilon = 12$, $N = 1400$ rpm)

Fig. 4 Output (DME/methane-HCCI and diesel)

毎で採ったものをパラメーターとした。この図より、メタンの混合割合増加に伴い、高い軸出力が得られることがわかる。これは、メタンによって熱発生が緩慢化し、燃焼室内圧力ピーク時期が適切な時期に近づいたためであると考えられる。

5. 結 論

- (1) DME にメタンを添加することで、ノッキングを回避して、投入熱量を増やすことが可能である。
- (2) DME にメタンを添加することで、急峻な熱発生を回避することができた。
- (3) 圧縮比 $\varepsilon = 12$ の HCCI 運転において、メタン添加量を適当にすることで、ディーゼル機関の軸出力に近づけることができた。

参 考 文 献

- (1) 金野満, 梶谷修一, 陳之立, 渡部泰幸: 日本機械学会論文集 (B 編), 67 巻, 662 号, pp. 223-229 (2001)
- (2) 吉田, 小関, 田村, 庄司, 吉田, 島田, 柴野: 自動車技術会論文集, 20054547, Vol. 36, No.4, pp.39-44 (2005)
- (3) Curran, H. J., Pitz, W. J., Westbrook, C. K., Dagaut, P., Boettner, J.-C., and Cathonnet, M.: A Wide Range Modeling Study of Dimethyl Ether Oxidation, International Journal of Chemical Kinetics, Vol. 30, No. 3, pp. 229-241 (1998)