

DME を燃料とする補助動力用 低公害・高効率 HCCI 機関の開発研究

研究代表者 慶應義塾大学理工学部 教授 飯田訓正

1. 緒言

バスおよびトラックの分野では、排出ガスの規制が年々と厳しくなり、機関の改良と共に燃料による排気特性の改善が図られている。特に日本においてはクリーンな DME を燃料とする自動車の開発が先行しており、優れた排気特性、動力特性を実現し、石油代替燃料としての高いポテンシャルが確認されている⁽¹⁾。同様に、冷凍機器、発電機などの駆動用小型機関への DME の利用が望まれている。

一方で、従来の燃焼方式と異なる低公害・高効率な「予混合圧縮自己着火 (HCCI) 機関」が注目され、様々な研究が行なわれてきた^{(2)・(5)}。HCCI 機関とは空気と燃料の予混合気を燃焼室内に供給し、ピストンによる圧縮で高温・高圧場となり多点で同時に自己着火することで動力を得る機関であり、ディーゼル機関並みの高効率と低火炎温度、予混合気による低公害の同時実現が可能である。しかし、HCCI 機関には着火時期の制御、ノッキングの回避、燃焼効率の向上という課題があり、解決策が模索されている。解決策の一つとして、HCCI 機関に適した燃料に関する研究が数多くなされている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。石油代替燃料として期待される Methane, *n*-Butane, DME の燃焼特性の比較を表 1, 素反応数値計算から得られた着火遅れを図 1 に示す⁽⁸⁾。燃焼特性の面で DME は、低温酸化反応 (LTR) と高温酸化反応 (HTR) の二段の熱発生を有し、LTR での発熱量が大きく主燃焼である HTR の発現を促進することや、HTR の発現温度が低いことから、着火性に優れた燃料であり、HCCI 燃焼に適した燃料であるといえる。

本プロジェクトでは、HCCI 機関の制御手法を確立し、クリーンな石油代替燃料である DME を燃料とする小型・軽量・低圧縮比の HCCI 機関の開発研究を行うことで、HCCI 機関の実用化の第 1 世代として発電機への利用を目指す。同時に、DME の燃焼特性に関する解析的な研究を行い、DME の HCCI 機関への適応性について調査する。

表 1 各種燃料の燃焼特性

	Methane CH ₄	<i>n</i> -Butane C ₄ H ₁₀	DME CH ₃ OCH ₃
Auto-Ignition Temperature	902 K	700 K	620 K
Cetane Number	0	<10	55-60
Low Temperature Reaction(LTR)	-	0-5 % 750-800 K	10-30 % 650-670 K
High Temperature Reaction(HTR)	100 % 990 K	95-100 % 830-880 K	70-90 % 800-830 K

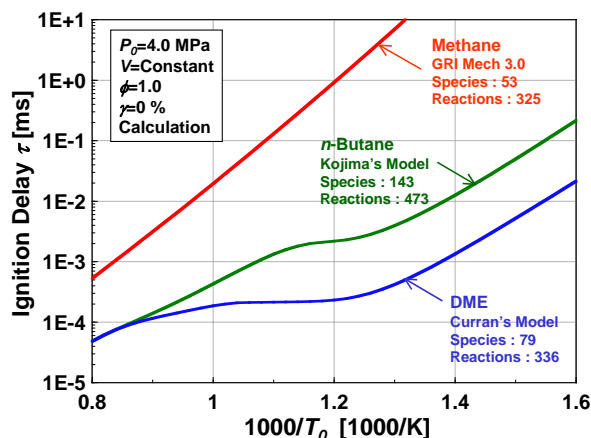


図 1 各種燃料の着火遅れ

2. 制御コンセプト

図2に本研究で提案する制御のコンセプトを示す。当量比 $\phi = 1.0$ の予混合気、高温の内部 EGR ガス、低温の外部 EGR ガスの三者のガス混合割合の調節によって、着火時期を制御し、急峻燃焼を抑制することで、高い熱効率の維持とノッキングを回避した HCCI 運転を行う。

I. 着火時期の制御

高温の内部 EGR ガスの体積割合を調節し、圧縮開始時筒内温度を制御することで任意の着火時期を実現する。着火時期を適切に制御することで、高い熱効率を達成する。

II. ノッキングの回避

低温で不活性ガスを多く含む外部 EGR ガスを導入することで急峻な温度上昇を抑制し、燃焼反応速度を抑制することでノッキングを回避する。外部 EGR ガスの導入によって、高負荷への運転領域の拡張を目指す。

III. 燃焼効率の確保

予混合気量の調節によって投入燃料質量を調節し、高い燃焼完結性が得られる最高到達温度を確保し、高い燃焼効率を確保する。

IV. 負荷制御

当量比 $\phi=1.0$ の予混合気量の調節によって投入熱量を調節し、IMEP を制御する。

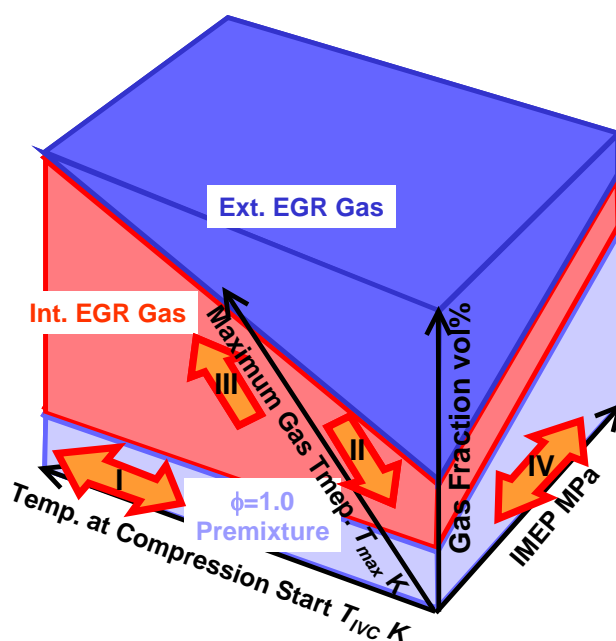


図2 制御コンセプト

3. 実験装置および方法

3.1. 供試機関

供試機関としては、ボア 82 mm，ストローク 64 mm，排気量 337 cc の HONDA GX340 K1 4ストロークガソリン機関をベースに用いる。圧縮比はヘッドとガスケットの交換により、8.13, 9.12, 10.76 と変更可能である。

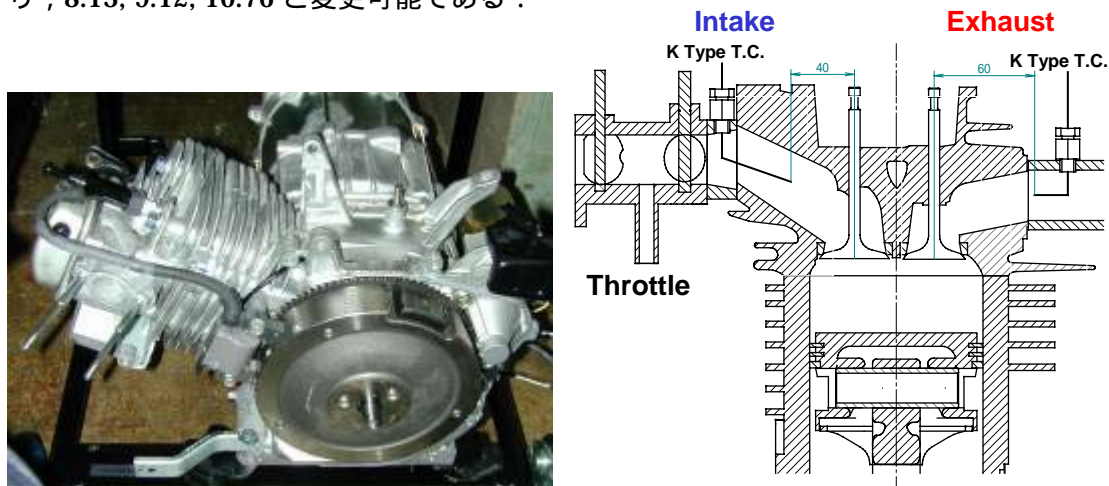


図3 供試機関外観写真(左)，燃焼室付近断面図(右)

3.2. 実験システム

図4に実験システム図，図5にシステム全体写真を示す。吸気ポートで空気とDMEの予混合気に排出ガスの一部を熱交換器によって冷却した低温の外部EGRガスが混合され，燃焼室内に導入される。また，排出ガスの一部が二段排気カム機構によって，排気側から高温の内部EGRガスとして燃焼室内に導入される。二段排気カム機構は吸気行程中に排気バルブを開けることにより，燃焼室内と排気管の圧力差を利用し，排出ガスを内部EGRガスとして燃焼室内に導入する手法である。本プロジェクトでは，吸気行程中の排気バルブリフト量の異なる四種類のカムシャフトを設計した(図7)。

当量比 $\phi = 1.0$ の予混合気，内部EGRガス，外部EGRガスの三種ガスの混合割合調節のために吸気側にスロットルA，B，排気側にスロットルC，外部EGRガス流路にスロットルDを設置し，スロットル軸に接続したステッピングモータによる開度制御を行う。また，燃焼流量の制御はデジタルマスフローコントローラ(DMFC)により行う。

さらに，データ集録・制御のためにNI社のPXIシステムを用いる(図6)。PXIシステムでは，センサからの入力，Lab VIEWでのリアルタイム演算およびアクチュエータへの出力を行う。本データ集録・制御システムでは図3に示すように，層流式流量計，筒内ガス圧力センサからの入力をもとに，解析をリアルタイムで行い，DMFCおよびステッピングモータへの出力を行うことで，データ集録と同時に運転条件設定や燃焼制御を行うことが可能である。

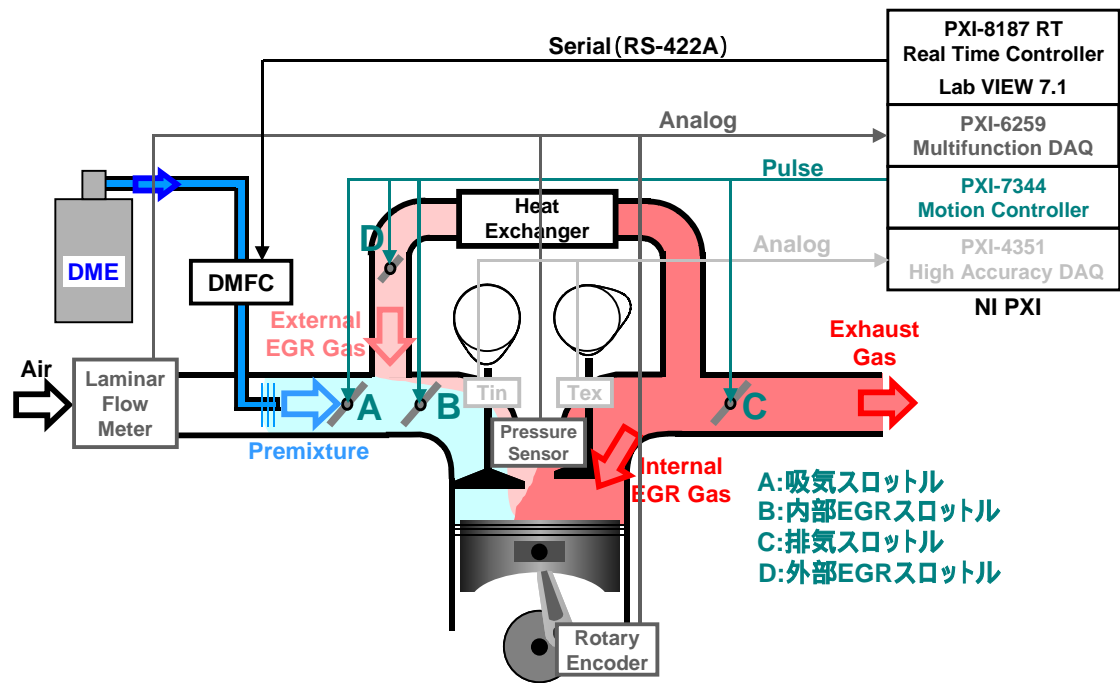


図4 実験システム図



図5 実験システム全体写真



図6 PXI システム

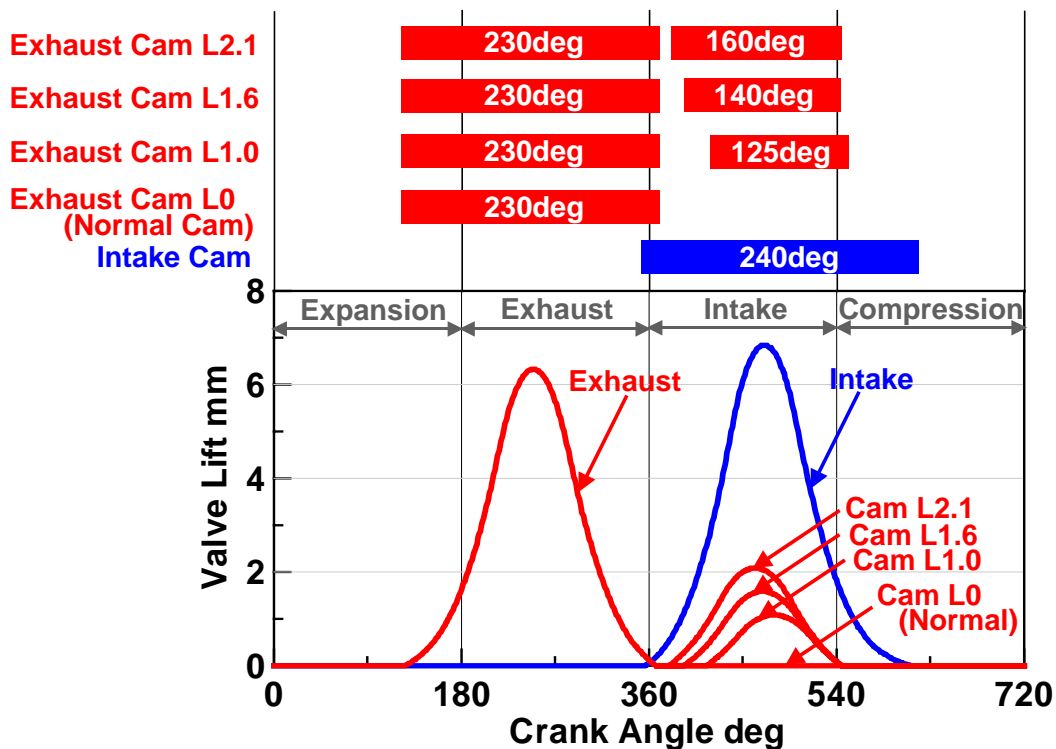


図7 バルブタイミング

4. 実験結果および考察

4. 1. 内部 EGR ガスと外部 EGR ガスの混合割合が HCCI 燃焼特性に及ぼす影響

図8に機関回転速度 $N_e=1500$ rpm, 圧縮比 $\varepsilon=10.76$, スロットル A 開度 $\theta_A=20$ deg, スロットル C 開度 $\theta_C=67$ deg, Cam L2.1 の条件で, 投入熱量 $Q_{in}=275 \pm 1$ J 一定となるようにスロットル B 開度 θ_B とスロットル D 開度 θ_D を調節し, 内部 EGR ガスと外部 EGR ガスの混合割合を変化させた際の圧力, 温度, 熱発生率履歴を示す. どの条件においても, LTR と HTR の二段の熱発生が確認でき, 本条件において LTR 発現温度は 792 ± 2 K, HTR 発現温度は 950 ± 5 K と他の燃料と比べ低温であることが確認された. また, 内部 EGR ガス量が減少し, 外部 EGR ガス量が増加すると, 圧縮開始時筒内平均ガス温度 T_{IVC} の低下とともに LTR 発現時期および HTR 発現時期, さらに CA50 が遅延化していることが分かる. ここで, CA50 は総発熱量の 50% の熱発生が終了した時のクランクアングル角度で, 燃焼重心位置を表す指標である⁽⁴⁾. このことより, 内部 EGR ガスと外部 EGR ガスの混合割合を変化させ, 圧縮開始時筒内平均ガス温度を調節することで, LTR 発現時期, HTR 発現時期および CA50 の制御が可能であると言える. さらに, 外部 EGR ガス量を増加させると, 燃焼反応速度が低下し圧力上昇が緩慢となっている. 燃焼反応速度は熱発生率の最大値を投入燃料質量により除した値で, ノッキング回避の指標となる⁽⁹⁾. このことより, 外部 EGR ガスの導入はノッキングの回避に有効であることがわかる.

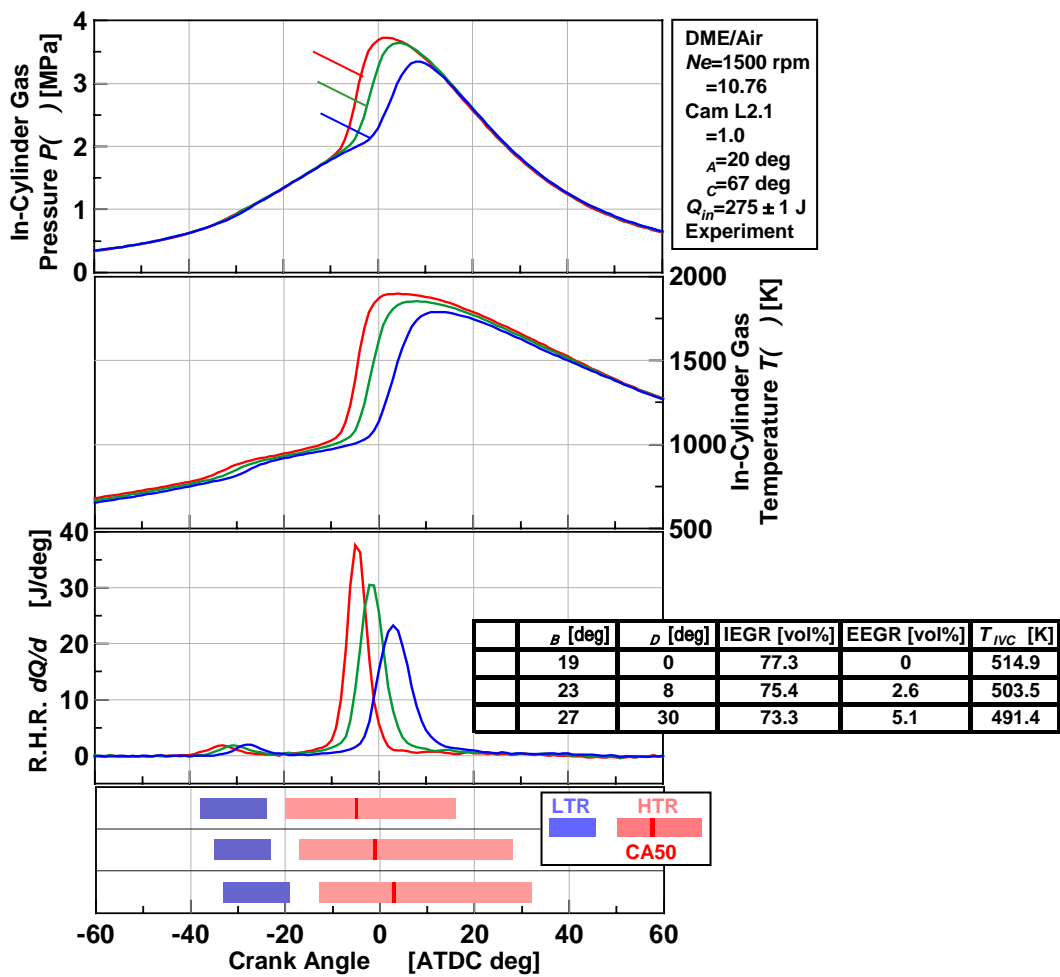


図8 内部 EGR ガスと外部 EGR ガスの混合割合が HCCI 燃焼特性に及ぼす影響

4.2. 図示熱効率および燃焼反応速度

図9に機関回転速度 $N_e=1500$ rpm, 圧縮比 $\varepsilon=10.76$, スロットル C 開度 $\theta_C=67$ deg, Cam L2.1 の条件で, IMEP が 0.29 ± 0.002 MPa, 0.30 ± 0.002 MPa, 0.31 ± 0.002 MPa 一定となるようにスロットル A, B, D 開度を变化させた時に CA50 が図示熱効率および燃焼反応速度に与える影響を示す. 図示熱効率は CA50 の遅延化とともに上昇し, CA50 が上死点後 4 deg 付近で最大値を取ることが分かる. また, 燃焼反応速度は CA50 の遅延化とともに減少しており, CA50 の値が上死点後の時には低い値を保っている. これは主燃焼が膨張行程に遷移したことにより圧力上昇が緩慢になったためである. 以上のことより, ノッキングを回避し, 高図示熱効率を確保した HCCI 運転を行うためには, CA50 を上死点後に維持する必要がある.

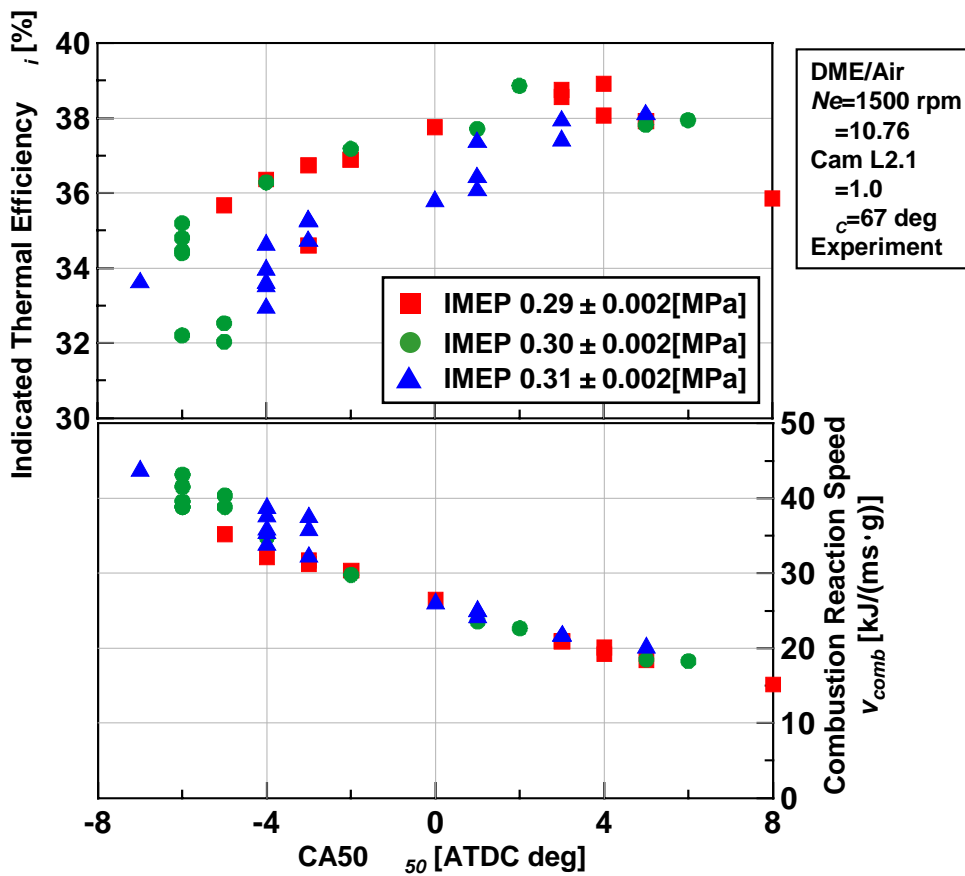


図9 CA50 が図示熱効率および燃焼反応速度に及ぼす影響

4.3. 排気特性

図10に機関回転速度 $N_e = 1500$ rpm, 圧縮比 $\varepsilon = 8.13$ の条件で, カムを変化させた際の HCCI 燃焼の排気特性を示す. 最高到達温度の上昇に伴い, CO の排出量は減少し, CO₂ の排出量は増加する. これは, 最高到達温度の上昇に伴って, 燃焼反応が促進したためであり, 最高到達温度が 1600 K 以下では反応が CO で凍結し, 燃焼完結性が低いのに対し, 最高到達温度が上昇することで, 中間生成物である CO が CO₂ まで酸化したためである. また, NO_x は最高到達温度が 1900 K 以上になると, 排出量が指数関数的に増加する. そのため, 燃焼完結性を確保し, NO_x 排出抑制のためには, 最高到達温度を 1600 K ~ 1900 K の狭い範囲に制御する必要があることが明らかになった.

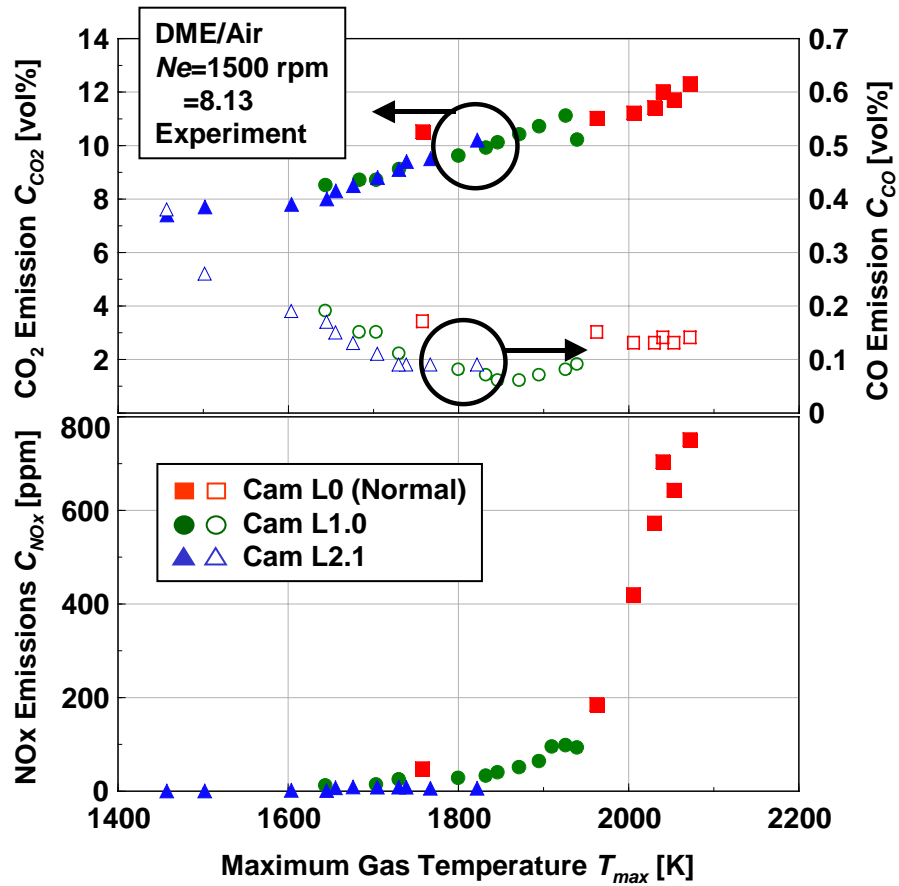


図 10 HCCI 燃焼の排気特性

4.4. 運転領域

図 11 に圧縮比 $\varepsilon = 10.76$, Cam L2.1 の条件での HCCI 運転可能領域を示す . 当量比 1.0 予混合気 , 内部 EGR ガス , 外部 EGR ガスでの HCCI 運転可能領域は 1500 rpm , 1750 rpm , 2000 rpm のどの回転速度域でも IMEP で約 0.15 MPa の範囲を持つが , 更なる低負荷での HCCI 運転は希薄予混合気 , 内部 EGR ガスにより成立する . また , 機関回転速度の上昇とともに , ポンピングロスが増加し , HCCI 運転可能領域は低負荷側に遷移する .

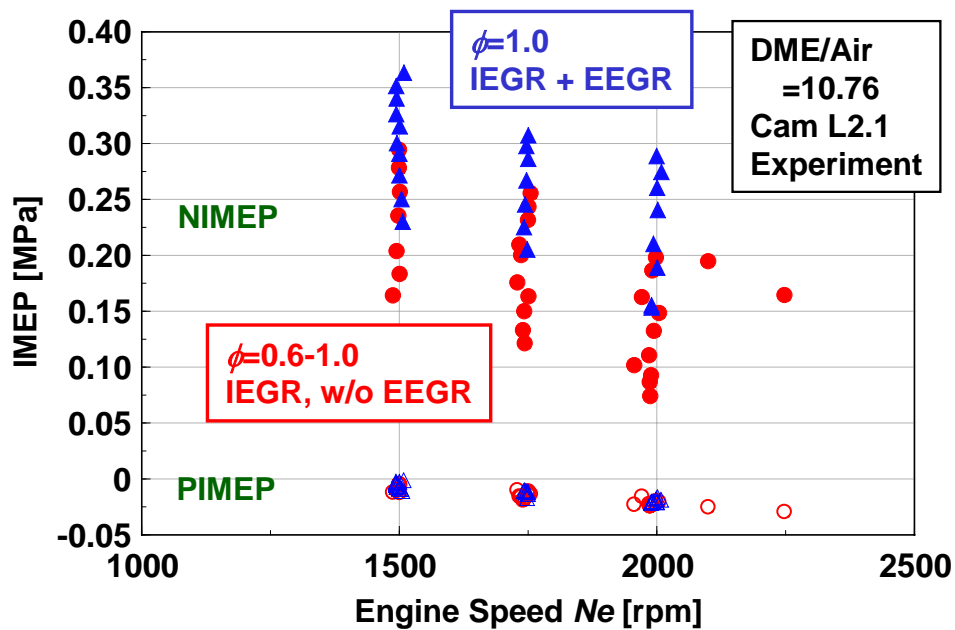


図 11 HCCI 運転可能領域

4.5. 本プロジェクトにおける達成点

図 12 に本プロジェクトにおいて達成した図示熱効率および IMEP を示す。図示熱効率に関しては、40%に近い値となり、目標とした汎用発電機に搭載されているディーゼル機関並みの値を得ることができた。しかし、IMEP に関しては、最高で 0.36 MPa の値を得ることができたが、目標とした値に到達することはできなかった。今後の課題として、更なる外部 EGR ガスの導入により、高負荷側への運転領域の拡大を目指す必要がある。

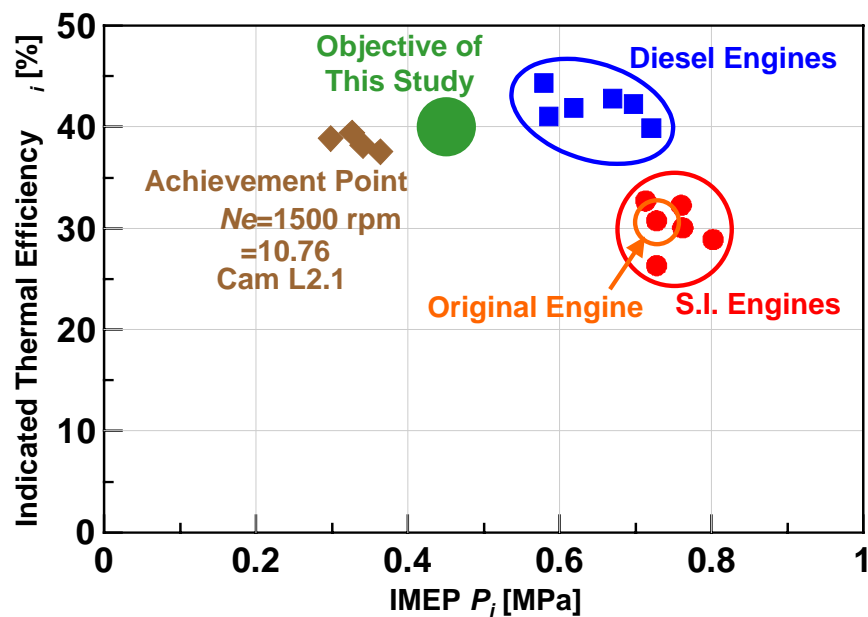


図 12 本プロジェクトにおける達成点

5. まとめ

本プロジェクトでは、HCCI 機関の制御手法を確立し、クリーンな石油代替燃料である DME を燃料とする小型・軽量・低圧縮比の HCCI 機関の開発研究を行い、同時に DME の燃焼特性に関する解析的な研究を行った。

- (1) 急峻な燃焼を抑制し、高い熱効率を確保した HCCI 運転を行うためには、燃焼重心位置の指標となる CA50 を上死点後に維持する必要があることが明らかになった。本研究で提案したように、当量比 $\phi = 1.0$ の予混合気、高温の内部 EGR ガス、低温の外部 EGR ガスの三種ガス混合割合の制御によって、CA50 の制御が可能となった。
- (2) CO, CO₂, NO_x 排出量は最高到達温度に依存し、反応が CO で凍結せずに燃焼完結性を確保し、NO_x 排出量を抑制するためには、最高到達温度を 1600 K ~ 1900 K の狭い範囲に制御する必要がある。
- (3) 高負荷では当量比 1.0 予混合気、内部 EGR ガス、外部 EGR ガスでの HCCI 運転が、低負荷では希薄予混合気、内部 EGR ガスでの HCCI 運転が可能となる。
- (4) 本研究より、新燃焼方式の HCCI 機関の燃料として、石油代替燃料として注目される DME の利用が有効であることが確認された。
- (5) 図示熱効率は目標としたディーゼル機関並みの値を達成することができたが、IMEP は低い値となってしまった。今後、DME を燃料とする HCCI 機関を実用化するためには、更なる外部 EGR ガスの導入により高負荷・高回転速度側への運転領域拡大を目指す必要がある。

謝辞

本プロジェクトの遂行に当たり、多大な援助を頂きました JFE21 世紀財団に心から感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Kajitani S. , Chen Z. L. , Konno M and Rhee K. T. , “ Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct-Injection Diesel Engine Operated with DME ”, Spec Publ Soc Automot Eng , No. SP-1298 (1997) pp. 35-44
- (2) Shigeru Onishi , Shok Hong Jo , Katsuji Shoda , Pan Do Jo and Satoshi Kato , “ Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) A New Combustion Process for Internal Combustion Engines ”, SAE-790501 (1979)
- (3) Thring R. H. , “ Homogeneous-Charge Compression-Ignition (HCCI) Engines ”, SAE-892068 (1989)
- (4) Jan-Ola Olsson , Per Tunestal and Bengt Johnsson , “ Closed-Loop Control of an HCCI Engine ”, SAE-2001-01-1031 (2001)
- (5) 森本智史, 川端康晴, 桜井輝浩, 天野寿二, “ 天然ガスを燃料とする希薄予混合圧

- 縮自着火エンジンの運転特性 - EGR による性能向上 - ”,自動車技術会講演論文集 ,
Vol.32 , No.3 (2001) pp.31-36
- (6) Gen Shibata , Koji Oyama , Tomonori Urushihara and Tsuyoshi Nakano ,
“ Correlation of Low Temperature Heat Release with Fuel Composition and
HCCI Engine Combustion ”, SAE-2005-01-0138 (2005)
- (7) 佐藤進 , 権淳杓 , 山下大輔 , 飯田訓正 , “ HCCI 燃焼に適用可能な燃料に関する基礎
的研究 ”, 自動車技術会講演論文集 , Vol.36 , No.6(2005) pp.79-84 , 池本雅里 , 小
島雄一郎 , 飯田訓正 , “ DME を燃料とする HCCI 機関の EGR による制御システム
の開発 ”, 自動車技術会学術講演会前刷集 (2005) No.40-05
- (9) 山崎由大 , 飯田訓正 , “ 圧縮自己着火機関における n-Butane 空気予混合気の素反応
数値計算 - 反応速度の制御 , 高効率燃焼の確保および HC , CO 排出量低減 - “ ,
自動車技術会講演論文集 , Vol.33 , No.4 (2002) pp.69-75

本研究に関する発表論文

- [1] 池本雅里 , 小島雄一郎 , 飯田訓正 , “ DME を燃料とする HCCI 機関の EGR による
制御システムの開発 ”, 自動車技術会学術講演会前刷集 , No.40-05 (2005)
- [2] 大村哲生 , 池本雅里 , 飯田訓正 , “ ジメチルエーテルを燃料とする高効率予混合圧縮
自己着火機関の開発 ”, 2005 年度年次大会講演論文集 , Vol.3 (2005) pp.77-78
- [3] Masato Ikemoto , Yuichiro Kojima and Norimasa Iida , “ Development of the
Control System Using EGR Gas for the HCCI Engine Running on DME ” ,
SETC2005 , SAE-2005-32-0062 (2005)

