

431 DMEを用いたHCCI機関の圧縮比変化における燃焼解析

Analysis of Combustion to Varied Compression Ratio in DME-HCCI Engine

○学 濱田啓佑(日大院) 学 新島瞬(日大院) 学 清水健一(日大院) 学 新藤孝太(日大院)
学 吉田和範(日大院) 正 庄司秀夫(日大)

Keisuke HAMADA, Syun NIJIMA, Kenichi SHIMIZU, Kota SHINDO, Kazunori YOSHIDA,
Hideo SHOJI, Nihon University, 1-8 Surugadai Kanda, Chiyoda-ku Tokyo

Key Words: DME, HCCI, Auto-ignition, Low Temperature Reaction

1. 序 論

予混合圧縮着火燃焼⁽¹⁾ (以下, HCCI 燃焼とする) は従来のディーゼル機関では成し得なかった NO_x, および PM の同時低減が可能であることから, 脚光を浴びている。しかし, HCCI 燃焼は着火に至るまでに多くを化学反応に依存してしまうために, 現状では圧縮着火運転の領域が狭く, 着火時期制御が困難となっている。そこで, HCCI 燃焼における着火時期制御, 燃焼期間の制御を行うためには, 着火および燃焼特性を詳細に把握する必要がある。そこで, 本研究ではディーゼル機関に DME を供給することで HCCI 燃焼を起こし, 圧縮比の変化が熱発生にどのような影響を及ぼすかについて調べた。

2. 実験装置および実験方法

供試機関には空冷単気筒ディーゼル機関を使用した。その機関仕様を表 1 に示す。

燃料として DME を用い, 機関回転数 $N = 1400$ [rpm] 一定とし, 機関圧縮比 ϵ はシリンダとクランクケースとの間にスペーサを挟みこむことにより変化させ, $\epsilon = 21, 18, 15$ [-] と 3 段階に変化させた。当量比 ϕ は圧縮比により運転可能な限り変化させて実験を行った。それぞれの圧縮比での採用当量比は以下の通りである。 $\epsilon = 21$ では $\phi = 0.21 \sim 0.31$ [-], $\epsilon = 18$ では $\phi = 0.23 \sim 0.36$ [-], $\epsilon = 15$ では $\phi = 0.24 \sim 0.40$ [-] である。DME は吸気弁より約 600 [mm] 上流の予混合装置内⁽²⁾に常時投入され, 予混合気を形成する。予混合装置内では, その中心においてノズルの向きを吸気の流れる方向と逆にすることで燃料の拡散混合を図った。

実験装置の概要を図 1 に示す。シリンダヘッド上部に石英観測窓ホルダを取り付け, 燃焼室内の火炎光を採取している。石英観測窓ホルダからの火炎光はコア径 1 [mm] の光ファイバにより多波長分光器へ導かれ, HCHO 発光波長 395.2 [nm], HCO 発光波長 329.8 [nm], OH ラジカル発光波長 306.4 [nm] の 3 波長に分光される。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。また, シリンダヘッドの上面に, 水晶圧力変換器, K 型シース熱電対を取り付け, シリンダ内圧力, 燃焼室壁温度を測定している。そして, 燃焼室壁温度と同様に K 型シース熱電対を用い, 排気温度の測定も行った。

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	21:1	18:1	15:1
Valve Arrangement	OHV		
Type of Piston	Reentrant		

3. 実験結果及び考察

図 2 は機関回転数 $N = 1400$ rpm, 当量比 $\phi = 0.30$ で一定とし, 圧

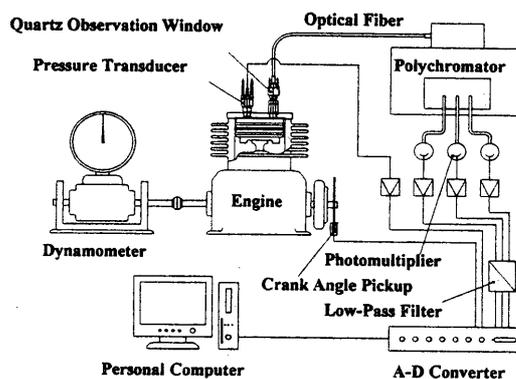


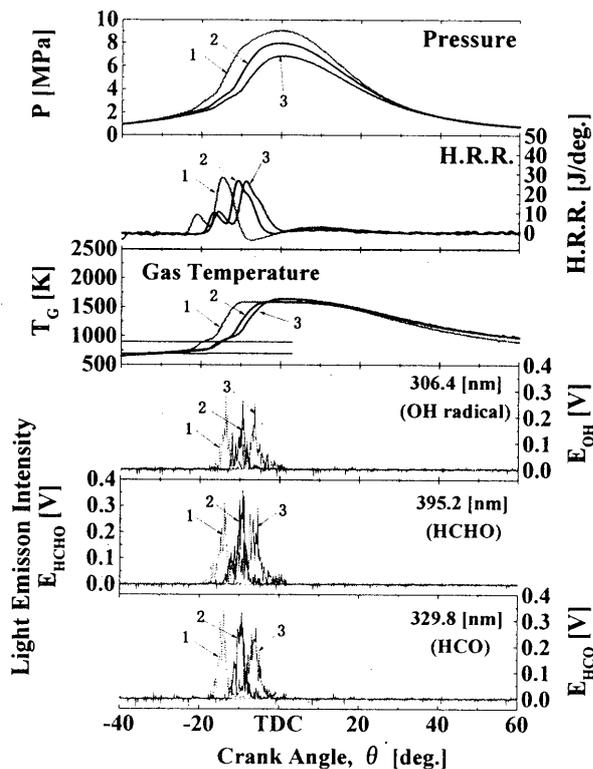
Fig. 1 Configuration of Test Equipment

縮比を $\epsilon = 21, 18, 15$ と変化させて HCCI 運転させた際の測定波形である。横軸にクランク角 θ [deg.] をとり, 縦軸に上からシリンダ内圧力 P [MPa], 指圧線図から幾何学的に求めた熱発生率 $H.R.R.$ [J/deg.], 指圧線図から状態方程式により求められた筒内の平均ガス温度 T_G [K], 燃焼室内の観測ポイントにおける OH ラジカルの発光強度 E_{OH} [V], HCHO の発光強度 E_{HCHO} [V], および HCO の発光強度 E_{HCO} [V] を示している。また, 運転条件の目安として波形下に各圧縮比における充填効率 η_c [%], 排気温度 T_{ex} [K], 及び燃焼室壁温度 T_w [K] を示した。

熱発生率波形より, 2 段の熱発生をしていることが確認できる。この多段の熱発生は DME を用いた予混合圧縮着火燃焼⁽³⁾⁽⁴⁾において特徴的な現象であり, 1 段目の熱発生は低温酸化反応, 2 段目の熱発生は高温酸化反応によるものと言われている。DME を用いた圧縮着火燃焼では理論的にはホルムアルデヒド生成反応, CO ラジカル生成反応, CO₂ 生成反応の 3 段の熱発生を示すと言われているが, 当量比の増加に伴い 2 段目と 3 段目の熱発生が一体化したものと考えられる。

各酸化反応の開始時期は圧縮比の低下に伴い遅角していることが確認できる。まず低温酸化反応について考えてみると, 低圧縮比ほど高圧縮比に比べて同一クランク角における圧縮圧が低く, 低温酸化反応が開始する温度に到達するのが遅角するためだと考えられる。高温酸化反応について考えてみると, 低温酸化反応の開始時期が遅角することにより, 低温酸化反応に伴う熱発生も遅角, それにより筒内ガス温度が高温酸化反応の反応開始する温度に到達するのが遅角したためだと考えられる。高温酸化反応のピーク値は圧縮比によらず, ほぼ一定の値を示した。当量比が一定であるため, 高温酸化反応での発熱量もほぼ一定であると考えられる。

圧力波形および筒内ガス温度波形を見ると, 各酸化反応の開始時期における圧力・温度がほぼ等しいことが確認できる。圧縮着火燃焼における低・高温酸化反応は, 温度場と圧力場により一意的に反応を開始することが知られている。筒内ガス温度が約 750K で 1 段目の, 約 1000K で 2 段目の温度上昇が開始している。これは, 熱発生率波形中の低温酸化反応, 高温酸化反応の開始時期とほぼ一致



	ϵ [-]	η_c [%]	T_{EX} [°C]	T_w [°C]
1	21	80.2	130.5	89.9
2	18	82.9	107.3	69.1
3	15	84.0	128.6	76.3

Fig. 2 Measured Wave Forms (N=1400 rpm, $\phi=0.30$)

しているため、この急激な筒内ガス温度・圧力の上昇は各酸化反応によるものと考えられる。

各中間生成物の発光挙動波形において、急激な発光強度の開始時期は圧縮比の低下に伴い遅角している。これは、各中間生成物の発光の開始時期は熱発生率波形における高温酸化反応の開始時期とほぼ一致していることから、圧縮比の低下による高温酸化反応の開始時期の遅角に付随して起こると考えられる。

また、熱発生率波形より低温酸化反応が発現していることは明らかであるが、低温酸化反応期間中に冷炎に相当すると言われているHCHOの発光は確認されていない。このことから、高温酸化反応は光を伴うような激しい酸化反応で、低温酸化反応は発光が微弱な酸化反応であると考えられる。

4. 解析結果

図4は、圧縮比を変化させた際の、x軸に当量比 ϕ [-], y軸に低温酸化反応における発熱量 S [J], z軸に低温酸化反応期間 τ_L [ms]を示している。低温酸化反応における発熱量は熱発生率波形中の面積 S を求めることにより解析した。

ここで、高温酸化反応に移行するために筒内ガス温度の上昇に影響を及ぼす要因としては、主にピストン圧縮による昇温、低温酸化反応における発熱による昇温、前サイクルによる壁面からの受熱等が考えられる。

各圧縮比 $\epsilon=15, 18, 21$ について比較すると、低圧縮比ほど低温酸化反応における発熱量が増加していることが確認できる。低圧縮比ほど低温酸化反応の開始時期は遅角する。ここで、90° BTDC~TDCの間では遅角するほどピストン速度が遅くなり圧縮による温度上昇が緩慢になるため、低温酸化反応が進行すると考えられる。

一方、当量比の変化に対して、比較的低当量比の領域では当量比

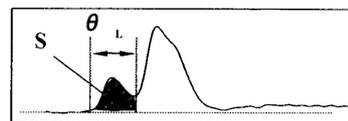


Fig.3 Definition of area S

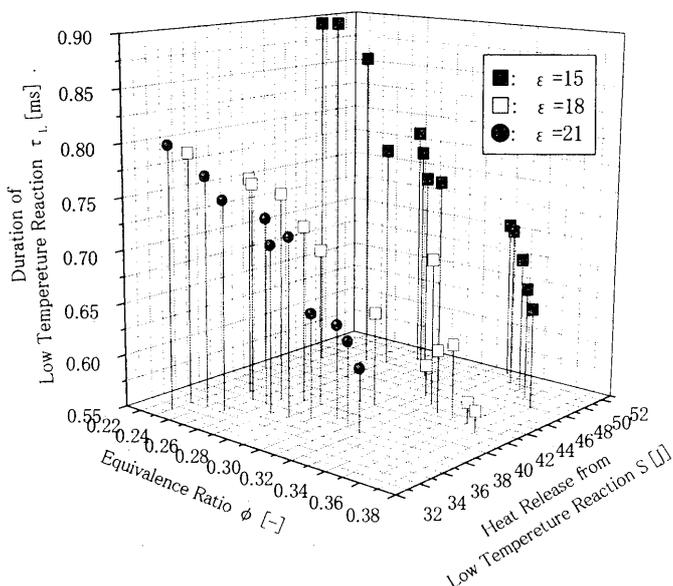


Fig.4 Duration and Heat Release of Low Temperature Reaction

の増加に伴い低温酸化反応からの発熱量は増加している。これは、当量比の増加に伴い低温酸化反応が促進されるため、発熱量が増加するものと考えられる。また、当量比の増加に伴い低温酸化反応の期間が短くなることから圧縮による昇温を待たずに低温酸化反応が進行し低温酸化反応における発熱量が増加するのではないかと考えられる。しかし、比較的高当量比領域では、低温酸化反応における発熱量は一定の値になっていることが確認できる。これは、本実験では実機を用いたため、高当量比になると壁面からの受熱等による影響が大きくなるからではないかと考えられる。高当量比になるほど1サイクルにおける発熱量が増加するため、燃焼室壁面温度が上昇する。このため、筒内ガスは高当量比になるほど燃焼室壁面からの受熱量が増加する。このことは、圧縮初期温度が高温になることと同様で、予め筒内ガスにエネルギーが蓄積されていることから低温酸化反応の反応が促進されるのにも関わらず、発熱量はほぼ一定となると考えられる。

5. 結論

- (1) 圧縮比の増加に伴い、低温・高温酸化反応の反応開始時期は進角する。
- (2) 低温酸化反応における発熱量は低圧縮比ほど発熱量が増大することが確認できた。
- (3) 低温酸化反応における発熱量は低当量比領域では当量比の増加に伴い増加するが、高当量比領域にいくと当量比によらずほぼ一定の値を示すことが確認できた。

6. 参考文献

- (1) T.Koseki, H.Shoji, et al.: SETC2003. Paper No. 2003-32-0006
- (2) 五十嵐, 飯田: 第14回内燃機関シンポジウム講演論文集 (97-9-3~5) P.277~282
- (3) 田村, 小関, 柏木, 吉田, 庄司: 第9期日本機械学会関東支部総会講演論文集 No.030-1.P.413~414
- (4) 清水, 小関, 田村, 吉田, 庄司: 日本機械学会関東支部茨城講演会講演論文集 No. 030-3. P.215~216