微細成層燃焼機関に関する研究*

(第2報, 微細成層燃焼機関の燃焼特性)

梶谷 修一**, 阿久津 孝信***

A Study of Micro Stratified Combustion Engine

(2nd Report, Combustion Characteristics of Micro Stratified Combustion Engine)

by Shuichi KAJITANI and Takanobu AKUTSU

An experiment of a single cylinder spark ignition engine was conducted at a constant engine speed, fixed air flow, and using gasoline as a fuel, to demonstrate the effects of micro-stratified combustion, which was verified in the first report, on combustion characteristics.

The characteristics of the micro-stratified combustion engine are those of retarded MBT spark timing, shortening of heat release lag duration, and lengthening of first half of the heat release duration, while the combustion duration shows little change.

The cyclic variation (such as standard deviation) in the peak cylinder pressure and so forth are much less for a fully vaporized fuel-air mixture than for the micro-stratification.

Also the experimental results show that micro-stratified combustion appears to have a considerable potential for the anti-knock property.

Key Words: Internal Combustion Engine, Micro-Stratified Combustion, Combustion Characteristics, Anti-Knock Property

1. 結 言

前報⁽¹⁾において均一混合気には油滴を添加する微細成層燃焼方式は燃焼室内の混合気流動が比較的弱く、油滴供給割合が全供給燃料量の40%以下で、かつ総空気過剰率が1.2より過濃側で達成されることを明らかにした。この際微細成層燃焼時の正味平均有効圧 P_{me} 、正味熱効率 η_e は均一混合気の際と同程度かわずかな増加(1%内外)であること、また微細成層燃焼方式での希薄可燃限界の拡大は得られないことも明らかにした。本報では前報で詳細に触れていない微細成層燃焼の際の燃焼特性について明らかになった結果を報告する。

2. 実験装置および方法

供試機関、油滴供給方法および機関運転条件は前報と同じであるが、耐ノック性に関する実験では圧縮比を8とし、点火位置は上死点におけるピストンとヘッドの間げきが狭くなる都合上、図1に示す燃焼室中央付近の点aとした。

3. 実験結果および考察

3・1 油滴添加の際の燃焼特性 図1にヘッドAおよびBで点火位置をa, b, c, dおよびeと変えた際の $R=0$ と $R=30$ の熱発生率を示す。点火時期はそれぞれMBT点火時期である。全般的に $R=0$ に比較して $R=30$ では発熱は緩慢になっている。図2に示す熱発生率曲線で点火から発熱開始までの期間を発熱遅れ期間、発熱開始から $(dQ/d\theta)_{max}$ に達する期間を燃焼前半期間および $dQ/d\theta$ が正の期間を燃焼期間と定義する。図3に点火位置を変えた際の発熱遅れ期間を、図4には燃焼期間および燃焼前半期間を示す。発熱遅れ期間はいずれのヘッドでも油滴を添加することにより均一混合気の際より短くなり、かつヘッドAよりヘッドBのほうがより短くなっている。燃焼期間はヘッドAでは油滴添加によりわずかに長くなるか同程度であり、ヘッドBではわずかに短くなるか同程度である。燃焼前半期間はヘッドA, Bとも油滴添加により点火位置c, d, eで均一混合気の際より長くなっている。図5に総空気過剰率 $\lambda_t=1.0$ とし点火位置cで油滴供給割合 R を20, 30, 40, 50, 60%と変えた際の熱発生率を示す。ヘッドAでは $R=20, 30$ のほうが $R=0$ の際より発熱は緩慢であるが、油滴量の増加

* 昭和58年11月22日 第922回講演会において講演、原稿受付 昭和58年4月4日。

** 正員、茨城大学工学部 (〒316 日立市中成沢町4-12-1)。

*** (株)小松製作所 (〒323 小山市横倉新田400)。

する $R=40, 50, 60$ では点c近傍にも油滴が集まるためと考えられるが(前報図5で R が増加し $R=40, 50$ に達するまでのMBT点火時期は $R=0$ の際より遅れている)発熱は急激になっている。ヘッドBでも同様に油滴を添加することにより $R=40$ までは $R=0$ の際より発熱は緩慢になっている。図6に R を変えた際の発熱遅れ期間、燃焼期間および燃焼前半期間を示す。発熱遅れ期間はいずれのヘッドでも $R=50$ までは $R=0$ の際より短くなり、かつ燃焼前半期間は $R=40 \sim 50$ までは $R=0$ の際より長くなっている。燃焼期間はヘッドAでは $R=0$ の際と同程度であるが、ヘッドBでは $R=0$ の際よりわずかに短くなっている。

図7に油滴供給量を 0.06 cc/s 一定とした際の λ_i

図1 点火位置を変えた際の熱発生率 ($\lambda_i=1.0$)

図2 熱発生率による燃焼特性値の定義

に対する発熱遅れ期間、燃焼期間および燃焼前半期間を示す。発熱遅れ期間はいずれのヘッドでも $\lambda_i=1.2$ 付近までは $R=0$ の際より短く、また燃焼期間も $\lambda_i=1.2$ 付近まで $R=0$ の際と大きな差はないが、 $\lambda_i=1.3, 1.4$ と希薄になるにしたがい油滴添加でのほうが長くなっている。一方燃焼前半期間はヘッドBでは油滴添加でのほうが $R=0$ の際より長くなっているが、ヘッドAでは $\lambda_i=1.3, 1.4$ で $R=0$ の際より短縮している。これは前報図8の熱発生率および図5の $R=50, 60$ などの油滴量の多い際に極端な例として示されるように Bulk-Stratificationの影響が現れてきたためと考えられる。すなわち $\lambda_i=1.2$ より過濃な領域で油滴供給割合 $R=40$ 以下では燃焼室内の混合気流動が比較的弱い際には、油滴添加は発熱遅れを短縮し、燃焼期間に大きな影響をおよぼさず、燃焼前半期間を長くする傾向がある。これは圧縮行程で油滴の

図3 点火位置を変えた際の発熱遅れ期間

図4 点火位置を変えた際の燃焼期間と燃焼前半期間

図 5. R を変えた際の熱発生率($\lambda_t=1.0$) 図 6 R を変えた際の発熱遅れ期間および燃焼期間と燃焼前半期間

一部は気化し、油滴周囲に燃料蒸気層を形成し着火を容易にする。しかし油滴間は均一混合気の際より希薄であるため燃焼前半期間は緩慢な発熱となる。燃焼後半では未燃の油滴は高温となり、かつ膨張行程で余剰空気との混合により急速に火炎伝ば可能な混合気層を形成するため急激な燃焼となり、燃焼期間は $R=0$ の際と大きな差がないものと考えられる。燃焼室内の混合気流動により方向性のあるヘッド A では特に点火位置 a に油滴が集まり、点火位置 b には油滴が少ない Combination-Stratification が達成され、ヘッド B では燃焼室形状がより偏平なため、油滴はヘッド A より一様に分布する。いわゆる Micro-Stratification (微細成層燃焼) に近い状態が達成されていると言え得る。

3.2 微細成層燃焼の際の燃焼変動 実験には油滴が燃焼室内により均一に分布し微細成層燃焼に近い状態が達成されていると考えられるヘッド B を用いた。 $\lambda_t=1.0$ で R を変えた場合および油滴供給量 0.06 cc/s で λ_t を変えた場合の $P_{\max}$ およびその標準偏差 $S(P_{\max})$, $P_{\max}$ の生ずるクランク角 $^\circ\text{CA}-P_{\max}$ およびその標準偏差 $S(^\circ\text{CA}-P_{\max})$, $(dp/d\theta)_{\max}$ およびその標準偏差 $S(dp/d\theta)_{\max}$, $(dp/d\theta)_{\max}$ の生ずるクランク角 $^\circ\text{CA}-(dp/d\theta)_{\max}$ およびその標準偏差 $S[^\circ\text{CA}-(dp/d\theta)_{\max}]$ を図 8 および図 9 に示す。 $P_{\max}$, $(dp/d\theta)_{\max}$ は $R=40$ 付近までは $R=0$ の際より低減し、また

図 7 油滴供給量 0.06 cc/s 一定で λ_t を変えた際の発熱遅れ期間、燃焼期間および燃焼前半期間

$P_{\max}, (dp/d\theta)_{\max}$ を与えるクランク角も $R=0$ の際より遅れているが, $R=50$ 付近で $P_{\max}, (dp/d\theta)_{\max}$ は $R=0$ のに近づき, またそれらを与えるクランク角も進みだす。これは油滴供給量の増加が点火栓近傍を濃厚にして Bulk-Stratification の傾向が生じたためと考えられ, より過濃になる $R=60$ では再び $P_{\max}, (dp/d\theta)_{\max}$ は低減し, それらを与えるクランク角は遅れてくる。したがって, $S(P_{\max}), S(dp/d\theta)_{\max}$ および $S(^{\circ}\text{CA}-P_{\max}), S[^{\circ}\text{CA}-(dp/d\theta)_{\max}]$ は $R=40$ までは $R=0$ の際と同程度かわずかに増加するが, $R=40$ を越える油滴量では大幅に増加してくる。同様の傾向は油滴供給量 0.06 cc/s 一定にした際 (希薄になるにしたがい R は大きくなり $\lambda_t=1.4$ で 34% となる) にもみられ, 油滴添加により $R=0$ の際より $P_{\max}, (dp/d\theta)_{\max}$ は低減し, かつそれらを与えるクランク角も遅れている。さらに $\lambda_t=1.3$ より希薄になると $S(P_{\max}), S(dp/d\theta)_{\max}$ および $S(^{\circ}\text{CA}-P_{\max}), S[^{\circ}\text{CA}-(dp/d\theta)_{\max}]$ は $R=0$ の際より大きくなる。燃焼変動は点火柱近傍の空燃比, すなわち油滴の存在により影響をうけ $R=0$ の際より増加し, また油滴量が増加し点火栓近傍が過濃になると $P_{\max}, (dp/d\theta)_{\max}$ は減じ, それらを与えるクランク角は遅れ, かつ変動も大きくなる。また油滴間の混合気が過薄になる $\lambda_t > 1.3$ の領域では火炎伝ばは

困難になるため $P_{\max}, (dp/d\theta)_{\max}$ は減じ, それらを与えるクランク角は遅れると同時に変動も大きくなる。すなわち均一混合気に油滴を添加し, 微細成層燃焼が達成された際でも, 燃焼変動は均一混合気の際より増加する。また油滴量が増加し微細成層燃焼の領域を越えた際の燃焼変動は急激に増加する。

3.3 微細成層燃焼の際の耐ノック性 油滴が燃焼室全域に分布しており, かつ燃焼時にも油滴が存在していれば, 均一混合気の燃焼に比較して遅い MBT 点火時期, 低い $P_{\max}$ とともに端ガスが進行火炎により断熱圧縮される際にこの油滴群の気化潜熱などにより自発火を抑制し得る可能性がある。そこで微細成層燃焼機構での耐ノック性について検討した。点火時期固定で可変圧縮比機関で実験を行うべきであるが装置の都合上, 点火時期を進めることで実験を行った。なお圧縮比はスぺーサを除去することにより 8 とした。圧縮比 8 ではピストン頂面とヘッドとの間げきが減少するため点火場所を点 a に移動させた。その結果ヘッド B でも Combination-Stratification の傾向が生じているものと考えられるが, 定性的に微細成層燃焼時の耐ノック性を検討し得ると考えられる。ノックの発生はノック音, ノックセンサの出力および指圧波形の観察 (毎サイクルノックによる指圧波形の変形が観察

図 8 R を変えた際の燃焼変動

図 9 油滴供給量 0.06 cc/s 一定の際の燃焼変動

される点火時期をノック発生点火時期とした) により行った。指圧波形の解析には平均指圧波形を用いず、各サイクルごとについて解析し、その中から代表的な1サイクルを選んだ。これはノックの発生している指圧波形を平均化するとノック現象も円滑化され現象が

把握し難くなるためである。

図10にヘッドA, Bで $\lambda_t=1.0$ で R を20, 30, および40と変えた際の点火時期に対する正味燃料消費率SFCおよび正味平均有効圧 P_{me} を示す。

ヘッドAはヘッドBに比較し P_{me} は低減し、SFCは増加している。これは図11のヘッドA, Bで点火時期を変えた際の熱発生率に示されるように、ヘッドAでの燃焼はヘッドBより急激であり上死点前での発熱量が増加していること、および本実験のように空冷機関を用いヘッド温度を 180°C 一定にしている際には冷却損失が増加するためと考えられる。

ヘッドAでは油滴を添加してもノック発生点火時期は 18°CA で変わらないが、ヘッドBでは $R=0$ で 21°CA , $R=20, 30$ で 23°CA , $R=40$ で 21°CA AbTDCである。図12にヘッドA, Bでノック発生時の熱発生率を示す。なお点線はヘッドBで点火時期 18°CA AbTDCのものである。ヘッドBで 18°CA AbTDC点火でも 20°CA AbTDC付近にゆるやかな発熱の増加があるが、ノック音などは確認できなかった。圧縮比8では上死点におけるピストンとヘッドの間げきが小さくなり、燃焼室構造が圧縮比6:1の際より大きく変わる。このため直接的比較は困難であるが、ヘッドAでの上死点近傍での発生熱量の増加(図中ハッチン

図10 圧縮比8で油滴添加の際のSFCおよび P_{me}

図11 圧縮比8で点火時期を変えた際の熱発生率

図12 ノック発生時の熱発生率の比較

図13 R を変えた際の熱発生率の比較

図14 ノック発生の際の K_r および $K^{\circ}CA$

グの施してある領域)のためヘッドBより5°CA遅い点火時期にもかかわらず図中点火位置aだけノックの発生と考えられる再発熱の発生するクランク角の進みをもたらす。

図13にヘッドAおよびBで R を20, 30, 40と変えた際の熱発生率の比較を示す。ヘッドAでは油滴添加によるノック発生点火時期は変化しないが、発熱途中における急激な発熱は R を増すに従い増加している。しかしながらこの急激な発熱は数値的な意味はないから(すなわち圧力ピックアップの固有振動数や1°CAごとのサンプリング速度でノック振動のうち偶然得られたものである)この急激な発熱の始まる前までの発生熱量 q と供給された燃料の発生熱量 Q_{input} の比 K_r を求めたものを図14に示す。また上死点から急激な発熱を開始するクランク角の期間 $K^{\circ}CA$ も同図に示す。ヘッドAではノック以前の発熱量 q は R が増すに従い減少し、ヘッドBでは逆に増加している。ノック発生クランク角はヘッドBの $R=40$ を除き、いずれのヘッドでも上死点に近づく傾向がある。ヘッドAでは上死点近傍での急激な発熱のために、油滴を添加してもノック発生点火時期は $R=0$ の際と変わらず、油滴存在分だけ気化混合気は希薄になり発生熱量 q は減少する。すなわち上死点近傍の急激な発熱は端ガスを自然発火させるに十分なものであるため、 R が増加すると q は減少し端ガス量が増加するためノック発生クランク角と考えられる $K^{\circ}CA$ は上死点に近づくものと考えられる。

ヘッドBでも上死点におけるピストンとヘッドの間げきは小さく、点火位置aではBulk-Stratificationに近いCombination-Stratificationになっている。それゆえ、 $R=40$ (この時のノック発生点火時期は $R=0$ の際と同じ21°CAbTDCである)での初期の熱発生率曲線は $R=0$ の際より急激となり、上死点近傍での発生熱量は増加し K_r は $R=0$ の際より

大幅に増加する。 K_r の増加は端ガス量の減少を意味するから $K^{\circ}CA$ は $R=0$ の際より幾分長くなったものと考えられる。 $R=20, 30$ では $R=0$ の際より点火時期を2°CA進ませることが可能となっている。点火時期を $R=0$ の際より2°CA進ませているので当然ノック発生以前の発生熱量 q は増加するが、その値は油滴供給量が少ないので点火栓近傍は $R=40$ の際ほど濃厚にならず(前報図5でMBT点火時期は $R=40, 50$ で最も遅れている) $R=0$ と $R=40$ の中間的なものとなる。さらに油滴供給量が $R=40$ の際より少ないので、油滴間の空熱比は $R=40$ の際より濃厚となり、火炎伝ば速度は全体的に速くなるためノック発生点火時期を2°CA進ませたものと考えられる。さらに混合気流動の弱い燃焼室での微細成層燃焼ではノックを抑制し得る可能性があるとも考えられる。なおノック強度などについては調べていないのでノック強度を一定に保つての実験および可変圧縮比機関での確認が必要と考えている。

4. 結 論

均一混合気に油滴を添加することによる微細成層燃焼の際の燃焼特性について明らかになった結果を要約すると以下ようになる。

(1) 微細成層燃焼の特長は均一混合気の燃焼に比較して発熱遅れ期間(点火から発熱開始までの期間)を短縮し、燃焼期間(発熱が正の期間)に大きな影響をおよぼさずに燃焼前半期間[発熱開始から $(dQ/d\theta)_{max}$ に達する期間]を長くすることである。

(2) 微細成層燃焼の際の燃焼変動(P_{max} の標準偏差など)は均一混合気の際より増加する。

(3) 油滴添加の際の耐ノック性を点火時期を進ませることで調べた結果、Combination-Stratificationの際でも均一混合気に比較して(P_{me} をわずかに増加させSFCをわずかに減少させて)ノック発生点火時期を2°CA進ませることが可能であった。これは油滴添加により燃焼前半の発熱を減少させて上死点近傍での発生熱量を低減させたためと考えられるが、さらに混合気流動の弱い燃焼室で微細成層燃焼の際の確認が必要と考えている。

最後に本論文に適切な助言を与えられた茨城大学澤則弘教授に、また実験に協力いただいた尾崎広行君、植田操君に感謝します。

文 献

- (1) 梶谷・阿久津, 機械前刷(第922回), (昭58-11)。