希薄燃焼ガス機関に関する研究*

(副室式希薄燃焼における主室形状の影響)

中 園 徹^{*1}

Study of Lean Burn Gas Engine (Effect of Main Chamber)

Tohru NAKAZONO

The characteristics of prechamber lean burn were researched by using high-speed, small single-cylinder engines. The prechamber system can run at leaner mixture than the open chamber because the ignition lag of the prechamber and combustion period are very short and keep constant in spite of changing A/F. Without supplying gas to prechamber the main chamber is relatively effected by the combustion. However, while gas is supplied into the prechamber, the effect of the main chamber is relatively small. The strong squish decreases the combustion period, but NO_x is reduced. Then, THC is decreased by large squish area and high swirl.

Key Words: Internal Combustion Engine, Combustion, Premixed Combustion Swirl, Lean Burn Engine, Gas Engine, Prechamber System, SI Engine

1. まえがき

近年、地球環境保護の問題や省エネルギーの観点から、ガスエンジンを原動機としたコージェネレーションシステムが注目され、導入例が増加している。一方排気ガス規制はますます強化されており、低NO_x機関が要望されている。希薄燃焼機関は機関効率も高く、厳密な空燃比制御が不必要等の有利な点が多い。コージェネレーション用ガスエンジンでは主室式⁽¹⁾、副室式⁽²⁾⁽³⁾の希薄燃焼機関が開発され、欧州、アメリカでは、多くの実用例が報告されている。

筆者らは、ガス弁式を装着した中形の単筒試験機を用いて希薄燃焼ガス機関について調査した結果、主室式より副室式の方が希薄限界が延びるため、低NO_xと高効率が成立する可能性が高いことが分かった。⁽⁴⁾

また、副室式のガス弁式ではシュラウドバルブを特定の角度に設定する事によって機関性能が改善できる

事が分かった。原因としてシリンダ内の層状化と気流状態が影響しているのではないかと考えられる。またスキッシュの影響は明確ではなかった。

そこで、均一混合気を供給して層状化の影響を除去し、主室燃焼室形状を変更してスキッシュを発生させたり、スワール強さを変更して影響を調査したので、報告する。

2. 供試機関と実験装置

供試機関は単筒であり、電動コンプレッサーにて圧縮した空気を供給して運転した。排気管には、排気絞りをつけて過給機付き機関の排気圧力波形を再現した。混合気はスロットル上流のミキサーで形成して供給した。オーバーラップ時の吹き抜けを防止するため、オーバーラップを44°と小さくした。給気弁2弁、排気弁2弁の4弁である。給気ポートはディレクショナルポートとしスワールを発生させた。スワール比はパド

* 原稿受付 平成3年10月4日。

*¹ 正員、ヤンマーディーゼル(株)研究開発本部技術研究所
(〒618 京都府乙訓郡町大山崎字円明寺小字鎌田16)。

ルホイール法にて測定を行った。給気ポートの入口とシリンダ内の圧力比を0.95に設定してパドルホイールの回転数を測定し、機関回転数で割った値をスワール比とした。給気ポート形状及び副室の配置を図1に示す。

点火方式は、フルトランジスタ方式とし、2次電圧を一定に保持した。ガスは都市ガス13Aを使用した。

副室及び主室形状を図2に、機関諸元を表1に、副室諸元を表3に、給排気弁の開閉時期を表2に示す。燃焼室容積に対して4.0%の容積を持つ副室を、シリンダ中央に配した。また、ガスのみをボベット形チェックバルブを介して副室内に供給し、副室内を適正混合気とした。実験にあたっては副室に供給するガス量が常に一定となるように調圧を行った。副室の冷却効果を高めるために、副室をウォータージャケット内に設置した。

供試した主室燃焼室形状を表4及び図3に示す。主室燃焼室は圧縮比を14に保持しつつ、燃焼室開口径と燃焼室形状を変更した。トップクリアランスは1.5mmに保持した。燃焼室形状はスキッシュ流速が低く、乱れが低いレベルと考えられるバスタブと開口径が小さく、スキッシュ流速が高く乱れが高いレベルと考えら

図1 給気ポート形状及び副室の配置

表1 供試機関諸元

Bore *stroke	150mm * 165mm
Engine speed	1500rpm
BMEP	1.2MPa, 0.9MPa
Fuel gas	13A Town gas

表2 供試機関の給排気弁開閉時期

Valve Timing	Exhaust open	bBDC 54 °
	Exhaust close	aTDC 22 °
	Intake open	bTDC 22 °
	Intake close	aBDC 54 °

表3 供試副室諸元

Volume ratio	4.0%
Hole	4 holes
Location	Center of cylinder
Gas supply	check valve

図2 副室及び主室形状

図3 供試した主室形状

表4 供試主室燃焼室

Chamber	Diameter	Chamber type
1	$\phi 110\text{mm}$	Bathtub
2	$\phi 97\text{ mm}$	Troidal
3	$\phi 87\text{ mm}$	Re-entrant

れるリエントラント、開口径が中間であるトロイダルを設定し、乱れを強めることによる燃焼期間短縮を図った。また副室噴口角度は 140° とした。

排気絞りの後にサージタンクを設けて、サージタンク内から排気ガスを採取して、CO, NOx, THCについて濃度を測定した。また、シリンダ内圧力(主室側)を測定してシリンダ内最高圧力 $P_{\max}$ および360 サイクルの $P_{\max}$ の標準偏差を求めて、サイクル変動の指標とした。

3. 実験結果と考察

3・1 単室式と副室式の比較 バスタブ燃焼室と同一の開口径とし燃焼室深さを22、圧縮比を12とし中心に点火プラグを配して単室式燃焼とした。正味平均有効圧を0.9MPaとし点火時期をBTDC 18° として空燃比を変更した。また、副室式は圧縮比14、正味平均有効圧1.2MPaとし、点火時期をBTDC 10° とした。性能の比較を図4に示す。副室式は希薄側で運転できるためNOxが低く、高圧縮比、希薄燃焼と高出力のため熱消費率が低いことがわかる。

熱発生率の比較を図5に示す。単室式では着火遅れが希薄になることによって延び、燃焼期間も延びる傾向がある。これに対して副室式は希薄になっても着火遅れが短く、変化しない。また、副室からの火炎ジェットと思われる熱発生率のスパイクが見られる。主室燃焼と見られる後期の燃焼期間は延びる傾向が見られ

図4 単室式と副室式の性能の比較

図5 単室式と副室式の熱発生率の比較

る。希薄側で熱消費率を改善するためには着火遅れを短く保持し、燃焼期間を保持することが重要であり火炎ジェットが大きい役割をはたしていると思われる。

3・2 副室へのガス供給の影響 副室へガスを供給しない場合と副室へ15 Nℓ/min供給した場合の比較を図6に示す。15 Nℓ/minは全体の消費ガス量の約7%にあたる。正味平均有効圧0.9MPa, 点火時期はBTDC10°である。主室形状はバスタブを使用し、スワール比は1.59である。副室へガスを供給しない方式はTGP方式(Turbulence Generating Pot方式)と言われ自動車用機関として使用されたこともある方式である。副室へガスを供給することによって、希薄限界が大幅に延び熱消費率も低いことが分かる。副室へガスを供給しない場合と比較して、ガスを供給した場合はシリンダ内最高圧力も高く急速に燃焼していることが分かる。熱発生率の比較を図7に示す。点火時期はBTDC10°である。副室にガスを供給する場合の方が着火遅れが短く、熱発生率にスパイクが見られる。

これに対し副室にガスを供給しない場合は、着火遅れが長い空気過剰率が小さいため主室内の燃焼と見られる部分では急速に燃焼していることが分かる。

3・3 主室形状の影響

a TGP 燃焼 主室形状の影響を明確にするため副室にガスを供給しない状態で主室形状を変更した場合の性能を図8に示す。正味平均有効圧は0.9MPaであり、点火時期はBTDC10°である。熱消費率についてはバスタブ、リエントラント、トロイダル順で低い。シリンダ内最高圧力の変動率は、リエントラントが最も希薄側で安定しており、バスタブ、トロイダルの

図6 副室式へのガス供給の影響

図7 副室式へのガス供給の熱発生率パターンに与える影響

図8 主室形状の機関性能に与える影響 (TGP燃焼)

図9 主室形状の熱発生率パターンに与える影響 (TGP燃焼)

順で安定している。シリンダ内最高圧力は、リエントラント、トロイダル、バスタブの順で高くなっている。熱発生率の比較を図9に示す。リエントラントの熱発生率の最高値が最も高く、燃焼期間が短い。これに対しトロイダルの着火遅れがリエントラント、バスタブに対して長く、燃焼期間が長い。

副室にガスを供給しない場合でも副室からの火炎ジェットによって乱れが発生すると考えられるが、主室形状を変更してさらに乱れを与えることができると考えられる。最も乱れが強いと思われるリエントラント型は希薄限界が最も延び、燃焼期間も短縮されるが熱消費率は低くならない。また最も乱れが低いと考えられるバスタブの熱消費率が最も低い。これに対し、トロイダルの乱れレベルはバスタブより強いと考えられるが熱消費率は最も高くなっている。

ガスを供給しない場合は、副室からの火炎ジェットの影響が小さく、主室の影響が大きいと考えられる。

b 副室燃焼 正味平均有効圧を1.2MPa、点火時期をBTDC10°とし、副室にガスを15ℓ/min供給した場合の比較を図10に示す。シリンダ内最高圧変動率は全て4%以下と安定していた。熱消費率は副室にガスを供給しない場合と同様の傾向を示し、バスタブが最も低く、リエントラント、トロイダルの順に高くなっている事が分かる。THCは開口径の小さいリエントラントが最も高く、開口径が広いバスタブが最も低い。COについてはトロイダルがやや低くなっている。NOxはリエントラントが最も低くバスタブが最も高いことが分かる。

熱発生率の比較を図11に示す。熱発生率はガスを副室に供給しない場合と同様の傾向が見られ、リエントラントが最も燃焼期間が短く、バスタブ、トロイダルの順番となっている。また、ガスを供給した場合は、ガスを供給しない場合と比較して発生率パターンの差は小さくなっている。これは副室からの火炎ジェットの影響が支配的であるためと考えられる。

機関効率を決定する要因として、燃焼期間と着火遅れ、熱損失、燃焼率等が上げられる。リエントラント型燃焼室は着火遅れも短く燃焼期間も短い、熱損失も大きく、またTHCが高いため熱消費率が改善されにくいと思われる。

燃焼期間が短いとシリンダ内温度が高くなり一般的にNOxが高くなる傾向が見られるが、リエントラントの場合最も低くなっている。これに対してバスタブはHCが最も低く、NOxも高く熱消費率も低くなっている。すなわち、副室式希薄燃焼では副室からの火炎ジェットを有効に使用し、スキッシュを弱め開口径を広

図10 主室形状の機関性能に与える影響 (副室燃焼)

図11 主室形状の熱発生率パターンに与える影響 (副室燃焼)

げる方が有利と考えられる。特にスキッシュを発生させるために開口径を小さくすると、副室火炎ジェットの広がりを阻害する事となってTHCが増加するのではないかと考えられる。THCは未燃ガスと考えられ、特にライナーとピストンのクレビス部から発生し、酸化した後には排気されることが知られている。⁽⁵⁾ 従って、ライナー付近への火炎ジェットの到達によって酸化が推進されるのではないかと考えられる。

図12 スワール強さが機関性能に与える影響
(副室燃焼)

また、NOx について燃焼室内の火炎ジェット層状状態にも影響を受けると考えられ、燃焼室リップ部に強い乱れが発生するリエントラントではNOx が低減するのではないかと考えられる。

3・4 スワール強さの影響 副室からの火炎ジェットはスキッシュだけではなく、スワールによっても阻害される可能性がある。そこで、最も熱消費率が低く、THC 濃度も低いバスタブ燃焼室を用いてスワール強さを変更して、機関性能を計測した。スワール比は給気ポートのバルブ上部の形状を変更して、1.59と2.3 に調整した。スワールの変更の結果を図12に示す。スワール強さを変更してもNOx に差は見られないが、スワール比が低い方がTHC が低い。

また、熱消費率を比較すると空気過剰率2.1 以上ではスワール強さの影響は小さいことが分かる。第1 報ではスワール比が小さい方が熱消費が低くなる傾向が顕著であったが、均一混合気状態で比較スキッシュも強い状態では、この傾向は小さくなると思われる。

また、スワール強さが低くなることによって火炎ジェットがライナー近傍に到達しやすくなりTHC が低くなるのではないかと考えられる。

4. 結 論

以下に本研究のまとめを記す。

(1) 副室にガスを供給することによって着火遅れが短くなり副室からの火炎ジェットと思われる熱発生率にスパイクが見られる。主室に供給される混合気が希薄となっても着火おくれと熱発生率のスパイクは影響を受けにくい。

(2) 副室にガスを供給しない場合、主室燃焼室形状の燃焼状態に与える影響は大きい副室にガスを供給した場合、主室燃焼室形状の与える影響は小さい。

(3) 主室燃焼室の開口径を小さくすると燃焼期間は短縮されるがTHC も増加するため、熱消費率は増加する傾向があるので、開口径は広くした方がよいと考えられる。

(4) スワール強さによってTHC は影響を受け、スワール比が低くなるに従い、THC が減少する傾向がある。

(5) 副室式希薄燃焼方式では、副室からの火炎ジェットが支配的であり、主室形状は火炎ジェットを広がり易くする必要がある。強いスキッシュやスワールは火炎ジェットの広がりを阻害すると考えられる。

主室燃焼室形状を変更することによって燃焼状態を改善できるが、副室からの火炎ジェットが支配的と考えられる。従って副室の各諸元の持つ影響を明らかにする必要がある。また、希薄燃焼ではTHC, COが増加する傾向があるため効率を向上させるためにはTHC, COを低減することが今後の課題と思われる。

文 献

- (1) M.G.Kingston, 他 2 名, SAE paper 890211
- (2) Synder WE, Dexter SG, CIMAC paper 1989
- (3) 久保、他 3 名, 第9 回内燃機関合同シンポジウム 1991-123
- (4) 中園、夏目, 第9 回内燃機関合同シンポジウム 1991-124
- (5) 雑賀、他 2 名, 第8 回内燃機関合同シンポジウム