中形中速希薄燃焼ガスエンジンの開発研究* (燃焼室内局所ガス組成の分析と予燃焼室噴口設計要素の最適化に関する一考察)

後藤 悟^{*1}, 坂上 健幸^{*2}, 橋本 徹^{*1}

Development of Medium-Sized Medium-Speed Lean Burn Spark-Ignited Gas Engines (Analyzing Local Gas Composition within the Main Combustion Chamber and Optimizing the Design Factors of a Jet Hole in the Pre-Combustion Chamber)

Satoru GOTO, Takeyuki SAKAGAMI and Toru HASIMOTO

A high-speed gas sampling method was used to analyze the local gas composition within the main combustion chamber of a lean burn gas engine with a 260 mm bore. The spatial distribution of the gas composition and changes every crank angle were studied. The optimum design of a jet hole in the pre-combustion chamber was then investigated based on these results, with the aim of reducing CO and THC concentration and increasing the thermal efficiency. The engineering findings were evaluated by means of a performance test on a 6 cylinder engine.

Key Words: Internal Combustion Engine, Gas Fuel, Premixed Combustion, Lean Burn, Spark-Ignited Gas Engine, Pre-Combustion Chamber, High-Speed Gas Sampling, Local Gas Composition, CO・THC Concentration

1. はじめに

希薄燃焼ガスエンジンは、NO_xやCO₂排出量が少ないため、低公害エンジンとして注目されている。しかし三元触媒を使用するガスエンジンに比べて、CO、THCは増加する傾向にある⁽¹⁾⁽²⁾。したがって希薄燃焼ガスエンジン開発における重要な技術課題は、低NO_xを維持しながらCO、THCを低減し、出力と熱効率を向上することであろう。本開発研究は、BMEP 1.47 MPa、熱効率42%の高出力希薄燃焼ガスエンジン⁽³⁾の開発過程において実施したものである。まずシリンダ径260 mmの単気筒エンジンを供試して燃焼室内の局所燃焼ガスの組成分析を行い、組成の空間的分布とクランク角ごとの変化を調査した。この結果から、CO、THCの低減と熱効率の向上を目的とする予燃焼室噴口形状の最適化について考察し、これを6シリンダエンジン(シリンダ径260 mm)の性能実験により検証した。

2. 試験装置

表1に単気筒エンジン主要目を、図1に高速ガスサンプリング装置の概略を示す。ニードル形高速電磁弁に内径φ1.0 mm長さ15 mmのプロブを付け、先端をシリンダヘッド燃焼面に一致させている(図2)。ニードルバルブまでのデッドボリウムは約0.02 mlである。

サンプリングラインは真空ポンプにて減圧され、その後ガスサンプリング装置からの開弁時期と期間を制御する信号により高速電磁弁が駆動される。サンプリング回数と採取量から1回当たりのサンプリング量を求めると、爆発上死点前後では大気圧条件で約10 ml、下死点前後では約1 mlである。燃焼ガスの温度圧力を考慮して、半球状体積として示すと、燃焼室内では半径約8 mm程度の範囲となる。

採取したサンプルを真空引きしたサンプルガス注入装置に注入し、圧力はレギュレータにより所定の値に調整される。圧力調整後に、3台のガスクロマトグラフィーに分配して組成分析をする。高速電磁弁の動作設定値は次のとおりとした。

開弁期間: 20*°CA

開弁回数: 10~30回

* 1995年7月20日 第12回内燃機関シンポジウムにおいて講演、原稿受付 1995年12月27日。

^{*1} 正員、(株)新潟鉄工所 (〒373 太田市西新町125-1)。

^{*2} (株)新潟鉄工所 (〒144 東京都大田区蒲田本町1-10-1)。

開弁間隔：2 サイクル間引いて開弁

(連続も可能であるが弁耐久性を考慮した)

※最小開弁時間が 3 ms(18°C A)のため

3. 試験結果と考察

3・1 試験条件 エンジン運転条件は 150 kW_m (定格負荷), 点火時期(IT)BTDC 24°, 空気過剰率 2.1(排ガス O₂ 濃度 13.0%)とした。予燃焼室(PCC)への燃料ガス供給量は 1 m³・N/h, これは全燃料消費量の 2.6%に相当する。PCC 内の空気過剰率は, 混合気量を容積比により分配し計算⁽⁴⁾すると, 0.9 となる。サンプリング位置は図 2 に示すようにカム軸側吸排気弁間(CAM)に位置し, PCC 噴口に対向(DS), と噴口方向を 45° 変更し PCC トーチ間(IDS)とした場合を試験した。次にいずれも DS とし, シリンダの円周方向(EV-CAM-IV)と軸方向(CAM-R 70)の組成を計

測した。

3・2 燃焼ガス組成分析結果 図 3 は DS と IDS のクランク角ごとの組成を示す。クランク角はサンプリング期間(20°C A)の中間時期を示す。まず, DS のガス組成変化について考察をする。

(1) O₂ 濃度 点火時期前は THC 4.3%, O₂ 20.2%の混合気である。点火直後より O₂ は減少し上

Fig. 1 Scheme of High-Speed Gas Sampling and Analysis System

Table 1 Specification of Test Engine

Model		1-26HX-G
Bore	mm	260
Stroke	mm	275
Rated Speed	rpm	1000
Output/Cyl	kW/cyl	150
BMEP	MPa	1.23
Compression Ratio		9.6
Swirl Ratio		0.9
PCC Volume	%	2

Fig. 2 Gas Sampling Position

Fig. 3 Spatial Distribution of Gas Composition

死点(TDC)後 10° にて最低値(13%)となる。この値は排ガス(EX)中の O_2 濃度に一致する。その後 O_2 は徐々に増加し吸気弁開(IVO)の前で若干減少するが新気流入に従って再び増加し、最終的に点火前と同じ濃度となる。

(2) CO 濃度 点火前は検出されず、点火直後から上昇し、TDC 前でピークとなり、次いでボトムとなる。このときのボトム値は排ガス中の CO 濃度(530 ppm)とほぼ同じレベルである。TDC 後 50° から BDC 間の濃度変化は小さい。BDC 以降の排気行程において減少するが、燃焼ガスの流れに伴い未燃混合気がサンプリングされたと考えられる。IVO 後は掃気により 0%となる。

(3) CO_2 濃度 点火前はほとんど検出されず、点火後から上昇し TDC 直後に最高濃度に達する。この値は排ガス中の CO_2 濃度(4.5%)にほぼ一致する。その後ほぼ直線的に減少し、IVO 後の掃気により 0%となる。

(4) THC 濃度 点火後から減少し TDC 直後でボトムとなる。この値は排ガス中の THC 濃度(0.63%)にほぼ一致する。その後 THC は増加し 2%前後の濃度となる。IVO 後から新気流入に伴い上昇し始め、点火前の濃度レベルに近づく。

Fig. 4 Cylinder Pressure and Cumulative Heat Release

次にこれらの特性についての検証と考察を行う。まず、計測精度を検証する。本試験時の空気量と燃料ガス量(おのおの $848 \text{ m}^3 \cdot \text{N/h}$ と $38 \text{ m}^3 \cdot \text{N/h}$)から、混合気の THC 濃度と O_2 濃度を計算すると、おのおの 4.3%と 20.0%になる。点火前の計測値はほぼこの値に一致する。このことから、本計測方法は、燃焼室内のガス組成把握に対して十分な精度があると考えられる。

TDC 後 10° 近辺($0 \sim 20^\circ \text{CA}$)の組成が排ガス性状におおむね一致することについて考察する。熱発生解析によると、TDC 後 27° までに累積熱発生率が 100%となる(図 4)。壁面近傍や PCC トーチ間の不完全燃焼ガスや消炎領域の未燃混合気(以下、これらを併せて消炎領域と記す)の影響があるため、局所的には一致していないが、この時期の燃焼ガスは排ガスと同等の性状になっていると考えられる。別途、空気過剰率を変更して試験したが、同様な結果を得ている。

使用燃料ガスの性状($CH_4 90\%$, $C_2H_6 6\%$, $C_3H_8 3\%$, $C_4H_{10} 1\%$)と燃焼ガス分析によるメタン系炭化水素 CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , $n-C_4H_{10}$ の成分比はほぼ一致することを確認している。したがって、燃焼ガス中の THC を未燃燃料であるとする。

TDC 後 10° から O_2 , THC は増加し CO_2 は減少傾向を示す。サンプリング位置にピストンの下降とともに、消炎領域のガスが流入してきたためと考えられる。

3-3 DS と IDS の比較 IDS は DS に比べ、 O_2 , THC の減少が遅れ、TDC 後 10° でも DS と同じレベルまで下がらない。 CO_2 の上昇も遅れ、ピーク値も低い。 CO の TDC 前後におけるピークとボトムの時期も IDS のほうが遅れている。このことは、PCC トーチ間の燃焼が遅れて、消炎領域が形成されやすいことを示す。

EVO 以降の組成を見ると、DS は燃焼前成分(O_2) IDS は燃焼後成分(CO , CO_2)が増加している。これは、排気行程のために IV, IGV $\rightarrow$ EV 方向のガス流れが生じ、DS ではトーチ間の未燃混合気、IDS ではトーチ方向の既燃ガスがサンプリング位置に到達するため

Fig. 5 Spatial Distribution of Gas Composition

と考えられる。

IVO以降DSとIDSの差はほとんどない。これは新気をサンプリングしているためである。

3.4 サンプリング位置変更試験 図5はクランク角に対する各サンプリング位置のガス組成変化を示す。図6～9は同一クランク角における各サンプリング位置の組成を比較する。図5から、点火前のTHCとO₂はおおの4.3、20.2%と円周方向(EV-CAM-IV)、軸方向(CAM-R70)ともに同じ濃度である。したがって点火前におけるシリンダヘッド壁面近傍の混合気は、ほぼ均一な状態であることがわかる。

(1) O₂濃度 点火直後の-10°では、EV側は他の円周方向位置に比べてO₂濃度が低く、CO₂が高めである(図6, 8)。シリンダヘッド燃焼面の温度分布(IV側：低、EV側：高)からEV側の燃焼が促進されやすいことによる結果と考えられる。TDC直後10°において各サンプル位置でのO₂は最低値となる。濃度レベルはCAM側13%に対し他の位置では14%台である(図6)。

EVO(120°CA)前までの変化では、円周方向(EV-CAM-IV)は時間の経過に伴いTDC後70°くらいまでの間上昇する。各サンプリング位置の濃度はIV側

のほうがEV側より2%高い。THCもO₂と同様な変化を示し、IV側のほうがEV側より1%高い(図5)。この変化は燃焼室壁面近傍やデッドボリウム未燃混合気がサンプリング部に流入したためと考えられる。またIV側のO₂、THCが高いことから、IV側のほうがトーチ間や壁面近傍の消炎領域が大きいと考えられる。

軸方向R70の変化を見ると、TDC後70°までは円周方向と同様にO₂とTHCは増加するが70°以降減少する(図5)。これは、CO₂が上昇していることと、この部分がPCC噴口に近いことからPCC内の既燃ガスの流入による影響と推察される。

EVOからIVO間では、大きな変化はない。IVO以降CAM、R70におけるO₂がほぼ同じクランク角で同濃度となり、EV側の濃度上昇が遅れている(図5)。この原因は既燃ガスがIV、IGVからの新気によりEV側に押し出され、その結果EV側サンプリング位置への新気到達が遅れたためと考えられる。

(2) CO濃度 点火前は全位置で検出されていない(図7)。-10°において、EV側が若干高いが円周方向の濃度はほぼ同じである。軸方向R70のCO濃度は他に比べ高濃度である。これは、R70はPCCに近く、PCCトーチ火炎の到達がいちばん早く、CO濃度の高い燃焼ガスをサンプリングしているためである。PCC内燃焼ガスの分析(現在試験中)により、ピーク時7%程度の高濃度となる場合があることを確認している。

EVO以降、円周方向のCOは減少するが、軸方向R70は増加する。R70はPCCに最も近いサンプリング位置であることから、排気行程においてPCC内から吸い出された燃焼ガスの影響と考えられる。IVO後は、掃気により各位置のCOは減少する。CAM、IV側に比べて、EV側、R70の濃度低下は遅いが、排気弁閉までに0%となる。

(3) CO₂濃度 点火前に微量検出されるが、これは残留ガスであろう(図8)。点火後-10°においてEV側が他の位置に比べて高いレベルである。TDC以降CO₂はほぼ直線的に減少する。R70はTDC後70°近辺から上昇する。

(4) THC濃度 点火前-30°ではO₂同様全位置においてほぼ同濃度である(図9)。以降THCの変化はO₂の変化傾向とほぼ一致している。

以上、燃焼室内のガス組成は場所とクランク角ごとに異なる。これは消炎領域の未燃混合気の影響が大きい。消炎領域の広がりや燃焼室壁面の温度が挙げられる。予

Fig. 6 Spatial Distribution of O₂ Concentration

Fig. 8 Spatial Distribution of CO₂ Concentration

Fig. 7 Spatial Distribution of CO Concentration

Fig. 9 Spatial Distribution of THC Concentration

Fig. 10 Comparison of Heat Release and Engine Performance

燃焼室からのトーチ火炎方向では主燃焼室の希薄混合気の燃焼開始が早く、トーチ間では遅れて、不完全燃焼域や消炎領域が形成されやすいことがわかった。

4. 性能試験による検証

燃焼室内ガス組成分析の解析と考察から、予燃焼室からのトーチ火炎を広範囲に分布し燃焼を促進すれば、特にトーチ間の消炎領域が減少しCO, THCの低減と熱効率向上が期待できると考えられる。広範囲にトーチ火炎を分布しTDC前の燃焼率を高めるための方法として、PCCの突出し長さ、噴口角度、噴口数を要素として性能試験を実施した。試験はシリンダ径260 mmの6シリンダエンジン(6 L 26 HX-G)により、BMEP 1.47 MPaで実施した。

図10はTDC前の熱発生率と、同時に計測したエンジン性能(熱効率と排ガス性状)を比較したものである。図10から噴口数と径が同一でも、突出しを長くし

(+6 mm)トーチ火炎の広がり角度を大きく(110 → 130°)すると、TDC前の燃焼が促進されて累積熱発生量が多くなる。噴口径を小さくする($\phi 5 \rightarrow 3.5$)とTDC前の累積熱発生量が低下するが、多噴口化(4 → 6個)により改善できる。TDC前の燃焼促進の方向性とCD, THCの低減はおおむね一致している。また熱効率も改善されることがわかる。一方、 NO_x はTDC前の熱発生量が増えると上昇する。PCCの突出し長さを+6 mmとし、噴口数と径の組合せを(5- $\phi 4$)とした場合、 NO_x は17%上昇したが、COは20%、THCは15%低減し、熱効率は3%向上することが検証された。

5. ま と め

以上、希薄燃焼ガスエンジンの燃焼室内ガス組成分析の結果と予燃焼室形状の最適化に関する考察と検証結果を要約すると次のとおりとなる。

(1) 燃焼室内のガス組成は場所とクランク角ごとに異なる。これは消炎領域の未燃混合気の影響が大きい。消炎領域の広がりや燃焼室壁面の温度が挙げられる。

(2) PCC トーチ火炎間の燃焼は遅れ気味となり不完全燃焼域や消炎領域が形成されやすい。

(3) 点火前のシリンダヘッド壁面近傍の混合気はほぼ均一である。しかし、燃焼室壁面温度の高いEV近傍より、壁面温度の低いIV側のほうが不完全燃焼域や消炎領域が形成されやすい。

(4) 予燃焼室噴口の設計指針が得られた。すなわち、PCC トーチ火炎を広範囲に分布し、TDC前の燃焼を促進することがCO, THCの低減と熱効率向上に対して有効である。

(5) 具体的な形状では、PCCの突出し長さを+6 mmとし、噴口数と径の組合せの最適化(4- $\phi 5 \rightarrow 5-\phi 4$)により、BMEP 1.47 MPaにおいて、 NO_x は17%上昇したが、COは20%、THCは15%低減し、熱効率は3%向上の改善結果が得られた。

なお、ここで得られた予燃焼室噴口形状の最適化に関する技術知見は、BMEP 1.47 MPa、熱効率42%の希薄燃焼ガスエンジンの開発に適用されている。

文 献

- (1) Itoh, Y. and Goto, S., ほか2名, *CIMAC Paper*, D23 (1993).
- (2) 中園徹, 第10回内燃機関シンポジウム講演論文集, (1992), 481-486.
- (3) 後藤悟・伊藤恭裕・佐藤一也, 第11回内燃機関シンポジウム講演論文集, (1993), 585-590.
- (4) Goto, S. and Itoh, Y., ほか2名, *SAE Paper*, No. 901608 (1990).