

副室ジェット燃焼によるガソリンエンジンの 熱効率向上技術

Technology for Enhancing Thermal Efficiency of Gasoline Engine
by Pre-chamber Jet Combustion

小 林 広 樹*
Hiroki KOBAYASHI
大 田 篤 志*
Atsushi OHTA

甲 村 公 典*
Kiminori KOMURA
鳴 海 裕 樹*
Hiroki NARUMI

中 西 啓太朗*
Keitaro NAKANISHI
竹 形 徳 之*
Noriyuki TAKEGATA

要 旨

副室ジェット燃焼を採用した単気筒ガソリンエンジンで、過去に研究された正味熱効率 45% エンジンに対して 2 ポイントの正味熱効率向上を達成した。達成手法は機械圧縮比 16 とし、副室設計の最適化と副室内壁への断熱材のコーティングを実施し、圧縮比設定を含めた燃焼室形状の最適化をおこなった。その結果、同時に SULEV20 エミッション規制対応のため NO_x 排出量は 30 ppm と炭化水素排出量は 2000 ppm を達成した。また、燃焼安定性は CPmi 3% 以下と筒内圧力上昇率は 300 kPa/deg 以下とし、実車の振動騒音要求を満足する数値を達成した。

ABSTRACT

A two-point increase in brake thermal efficiency was achieved over an engine with a brake thermal efficiency of 45% from a previous study by using a single-cylinder gasoline engine adopting pre-chamber jet combustion. These results were achieved with a mechanical compression ratio of 16:1 by optimizing the pre-chamber design, coating the pre-chamber inner walls with thermal insulation, and optimizing the combustion chamber shape, including compression ratio settings. The resulting configuration also achieved NO_x emissions of 30 ppm and hydrocarbon emissions of 2000 ppm, which puts it in compliance with SULEV20 emission regulations. In addition, combustion stability was kept to a CPmi of 3% or lower, the rate of in-cylinder pressure increase to 300 kPa/deg or lower, and noise vibration requirements for actual vehicles were satisfied.

1. まえがき

近年、気候変動の原因の一つと考えられる CO_2 の排出量削減への取り組みが急速に進み、今後は Electric Vehicle (EV) や Fuel Cell Vehicle (FCV) などの Zero Emission Vehicle (ZEV) の割合が増加していくと予想されている。しかしながら、ZEV の普及拡大には時間が必要であると予測されており、内燃機関を積んだ Hybrid Electric Vehicle (HEV) と Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) が当分の間は主流となると考えられる。HEV と PHEV の燃費向上のためにはモータやバッテリーなどの電動技術の研究に加えて、内燃機関の正味熱効率向上技術の研究が必要である。Honda はこれまでの研究でガソリンエンジンにおいて正味熱効率 45% を達成⁽¹⁾しており、次のステップ

として正味熱効率 50% を目指している。正味熱効率 50% 達成のためには、高圧縮比エンジンへのリーン燃焼の採用が必要である。

そのため、リーン燃焼には高いノッキング抑制効果と厳しいエミッション規制に対応できるリーン限界性能が要求される。Honda では Homogeneous Lean-charge Spark Ignition (HLSI) 燃焼の研究⁽²⁾において、高いリーン限界性能と低 NO_x を達成した。しかし、均質リーン燃焼は EGR 燃焼に比べてノッキング抑制効果が低いことが知られている⁽³⁾。また、筒内エンドガスの希薄化によりノッキングを抑制する成層燃焼が考えられる。しかし、成層燃焼の課題は均質燃焼と比較して NO_x 排出量が高くなることである。成層燃焼は Direct Injection Stratified Charge (DISC) 燃焼が研究⁽⁴⁾されている。DISC 燃焼では EGR 導入を併用す

*四輪 R&D センター

ることで高いリーン限界性能と低 NO_x 排出量を両立している。EGR導入を併用すると熱効率向上効果が低下するため、熱効率向上の効果を最大限に得るためには、EGR導入を併用せずに低 NO_x 排出量を実現する成層燃焼が必要であると考えた。

本研究ではリーン燃焼で性能要求を達成する手段として、成層燃焼の一つである副室ジェット燃焼を研究した。副室ジェット燃焼のエンジン構成をFig. 1に示す。燃焼室の中央部に副室を設置し、その内部に点火プラグと副室内を量産点火システムのエネルギーで着火可能な空燃比(AFR)に制御するための専用直噴(DI)インジェクタを配置する構成となっている。また、主室側への燃料供給をおこなうポート噴射(PI)インジェクタを別に備える。それにより、主室と副室の混合気AFRが異なる成層燃焼をおこなう。また、副室ジェット燃焼は副室容積の設定によりリッチな混合気の割合が決められ、専用DIインジェクタでねらいのAFRに制御することができる。そのため、成層燃焼でありながら、 NO_x 排出量を低く抑えることが可能である。本稿では、その副室ジェット燃焼の研究について紹介する。

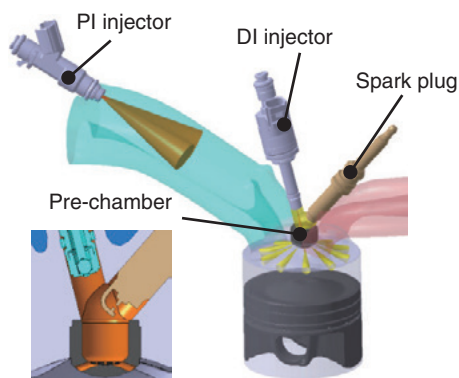


Fig. 1 Engine configuration for pre-chamber jet combustion

2. 目標値の設定

正味熱効率 50% 達成への各技術進化の目標設定として、廃熱回収、点火システム、インジェクタ、冷却損失低減技術などの技術進化で3ポイント、残り2ポイントをリーン燃焼で達成する。本研究のねらいは、過去に研究された正味熱効率 45% エンジン⁽¹⁾にリーン燃焼を組み合わせることで2ポイント以上の正味熱効率向上を達成することである。リーン燃焼を採用する場合、三元触媒による排ガス浄化ができない。そのため、リーン燃焼専用の後処理触媒の採用と燃焼室から排出されるエミッション(フィードエミッション)の低減により厳しいエミッション規制をクリアする必要がある。そこで、まず初めに、フィードエミッ

ン低減の目標値について検討した。目標とするエミッション規制はSULEV20とし、リーン燃焼専用の後処理触媒システム⁽⁵⁾の採用を前提に達成を目指した。触媒システム浄化率は炭化水素(HC)に対して99.6%、 NO_x に対して95.9%を前提とした。検討方法はFTP-75モード走行データから算出したモード中におけるエンジン回転数と負荷の運転頻度を使用し、定常積算によるモードシミュレーションをした。その計算結果から効率点負荷においてフィード NO_x 排出量は50 ppm以下、フィードHC排出量は2800 ppm以下を目標値とした。加えて、燃焼安定性と筒内圧力上昇率($dP/d\theta$)は実車の振動騒音要求を満足する数値にする必要がある。そこで本研究では、目標性能を最高正味熱効率の達成条件で正味熱効率向上を含め以下の五つと定めた。燃焼安定性の指標は図示平均有効圧変動率(CPmi)とした。

(1) 目標正味熱効率

45% 達成技術に対して2ポイント以上の向上

(2) SULEV20 達成のための目標エミッション

フィード NO_x 排出量は50 ppm以下

フィードHC排出量は2800 ppm以下

(3) 実車の振動騒音要求

CPmiは3%以下

$dP/d\theta$ は350 kPa/deg以下

次に、正味熱効率および NO_x 排出量の目標性能を達成するために要求されるAFRについて検討した。まず初めに、目標正味熱効率達成に必要なAFRについて検討した結果を説明する。検討には1次元シミュレーションを用いてMinimum advance for best torque (MBT)運転、主燃焼期間(MFB 10-90%)が25 deg固定とした場合の正味熱効率の変化をEGR燃焼およびリーン運転条件で計算した。計算は先の研究で正味熱効率45%を達成したエンジンの性能結果を基におこない、運転条件は最高正味熱効率達成条件とした。計算結果をFig. 2に示す。これより2ポイントの正味熱効率向上のためにはAFR 28以上のリーン限界性能が要求されることがわかった。

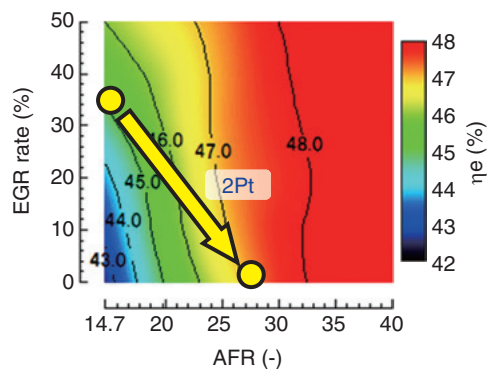


Fig. 2 Brake thermal efficiency for EGR combustion and lean combustion using 1-D simulation

次に、 NO_x 排出量 50 ppm 以下を達成するための AFR を明確にするために、先の研究で正味熱効率 45% 達成したエンジンで AFR に対する NO_x 排出量の特性を確認した。 NO_x 排出量は筒内最高温度と相関がありノッキングによる点火遅角により排出量が増加する。そのため、運転条件は、ノッキングによる影響が含まれないエンジン回転数 2000 rpm、図示平均有効圧 (IMEP) 470 kPa の運転条件で確認した。結果を Fig. 3 に示す。この結果から、 NO_x 排出量を 50 ppm 以下とするためには、AFR 30 以上のリーン限界性能が必要であることがわかった。上記の二つの検討結果から、AFR 30 以上で運転可能なリーン燃焼の実現を目指した。

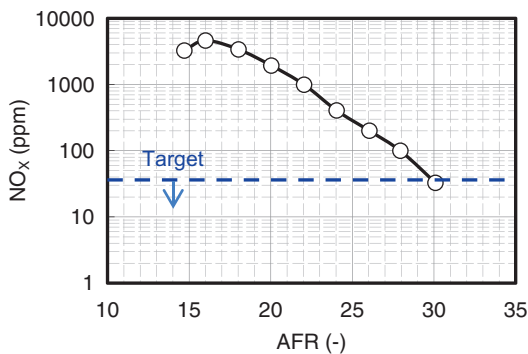


Fig. 3 Characteristics of NO_x emissions by AFR for base engine

3. 燃焼コンセプト

副室ジェット燃焼の燃焼過程について、Fig. 4 に示す副室ジェット燃焼をボトムビューで直接撮影した可視化画像および Computational Fluid Dynamics (CFD) の計算結果で説明する。主室へは吸気行程に PI インジェクタで燃料供給をし、圧縮行程に副室内の専用 DI インジェクタを噴射することで副室と主室の AFR が異なる混合気状態を形成する。その後、副室内の点火プラグにより点火 [Fig. 4 (1)] することで副室内の燃焼が開始され、主室と副室の間に圧力差が生じる。その圧力差を利用して副室から主室へ火炎が噴出し [Fig. 4 (2)]、その熱エネルギーにより主室の混合気が燃焼を開始する [Fig. 4 (3)]。このような燃焼形態をとるために、副室ジェット燃焼は安定した着火性能を確保でき、また主室の混合気が多点着火を起こすことで急速燃焼を実現することが可能な燃焼である。その結果、高いリーン限界性能の達成と同時にノッキングの抑制が期待できる燃焼である。

次に、副室ジェット燃焼が低 NO_x 排出量となる優位性について説明する。過去の成層燃焼では筒内流動と DI 噴射のサイクルばらつきが発生しても安定した着火性を確保

するため、プラグ近傍をリッチな AFR の混合気分布にする必要があった。また、プラグ近傍のリッチな AFR の混合気量も多かった。その結果、 NO_x 排出量が多くなることが課題であった。副室ジェット燃焼では、圧縮行程で副室内に燃料を噴射することで主室側へ燃料が流出することなく副室内に留まる。そのため、副室容積設定で筒内全体 AFR に対してリッチな AFR となる領域を調整できる優位性がある。また、副室内混合気をねらいの AFR に制御し、同時にプラグ近傍にリッチな混合気を毎サイクル安定して配置できる優位性がある。以上のような特性を持つため、成層燃焼でありながら NO_x 排出量の低減が実現できる燃焼である。

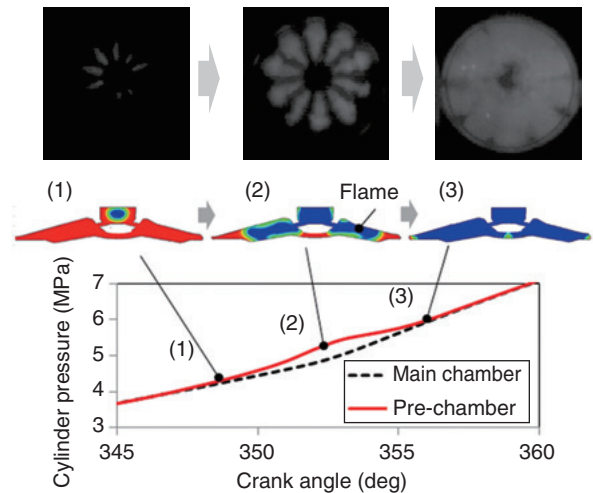


Fig. 4 Visualized direct bottom view and CFD calculations for pre-chamber jet combustion

4. エンジン設計

目標性能達成に向けた副室ジェット燃焼エンジンの各設計パラメータの影響を説明する。

4.1. 評価エンジン諸元

本研究に用いた供試エンジンの諸元を Table 1 に示す。このエンジンは、正味熱効率 45% を達成した研究において重要な要素であったボアストローク (S/B) 比と圧縮比は維持しつつ、ボア径を 73 mm とした単気筒エンジンである。また、同じく重要な要素であった吸気弁遅閉じアトキンソンサイクルも継承した。圧縮行程の圧縮比は吸気弁閉じ時の筒内容積に対する圧縮上死点の筒内容積から計算した圧縮比を実効圧縮比とした。また、膨張行程の圧縮比は膨張比 (機械圧縮比) として示す。

4.2. 副室設計

副室ジェット燃焼エンジンで主室の燃焼へ大きく影響を

Table 1 Test engine specifications for pre-chamber jet combustion

Number of cylinders	1
Displacement volume (cm ³)	458
Bore (mm)	φ 73
Stroke (mm)	109.5
Stroke/bore ratio	1.5
Expansion ratio	17.0
Effective compression ratio	12.5
Aspiration	Supercharger
Fuel supply (main/pre)	(PI/DI)
Ignition energy (mJ)	60

およぼす副室から主室へ供給される熱エネルギー量を決定する副室設計について検討した。主な副室の設計パラメータは、Fig. 5 に示す副室容積、副室噴孔数、副室噴孔径、それと副室噴孔数と副室噴孔径から計算される副室噴孔総断面積である。最適設計をするためにこれらの設計パラメータの各性能への影響を確認した。以下に、目標値の達成に大きく寄与した副室容積と副室噴孔総断面積について詳しく説明する。

Fig. 6 に過去に研究された正味熱効率 45% エンジンで最大正味熱効率となるエンジン回転数 2000 rpm, IMEP 810 kPa, AFR 35 の運転条件において副室容積を変更した場合の各性能への影響を示す。副室容積が小さいほど、NO_x 排出量および $dP/d\theta$ が低減できるが、一方で MFB 10-90% angle は増加する傾向にある。熱効率は副室容積 2.0 cm³ までは熱効率の低下はなく、それ以上小さくすると熱効率が低下する結果となった。NO_x 排出量が低減するのは副室容積が小さいほどリッチな混合気割合が低下するためである。また同時に副室内ガス量が低下するため副室から主室へ供給される熱エネルギーが低下し $dP/d\theta$ の低下および燃焼期間の増加が起こるためである。熱効率の変化に対しては、AFR 35 の運転条件で副室から主室へ供給される熱エネルギーが燃焼安定性を維持できなくなる熱エネルギー量になると HC が増加するため大きく熱効率が低下していると考えられる。以上の性能結果から、副室容積設定は NO_x 排出量および $dP/d\theta$ を最小にしつつ熱効率低下をおよぼさない 2.0 cm³ とした。

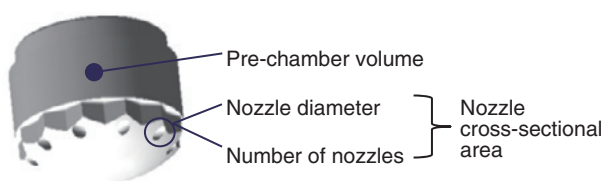
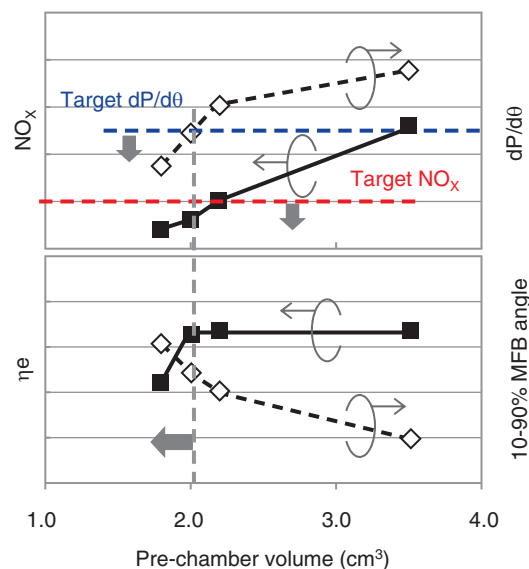
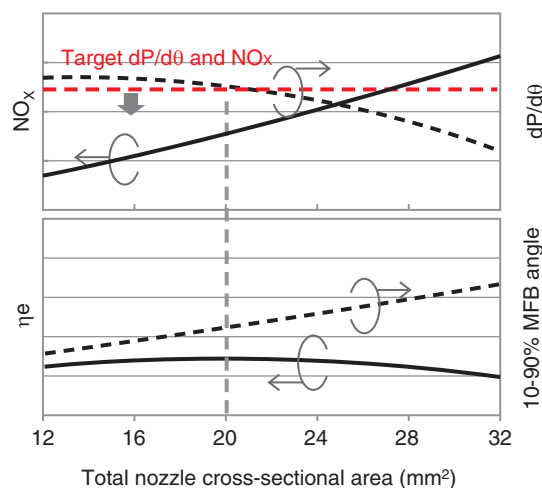


Fig. 5 Pre-chamber design parameters

Fig. 7 にエンジン回転数 2000 rpm, IMEP 810 kPa, AFR 35 の運転条件における副室噴孔総断面積を変更した場合の各性能への影響を示す。副室噴孔総断面積を小さくするほど NO_x 排出量は低減できるが、 $dP/d\theta$ が増加する。MFB 10-90% angle は副室噴孔総断面積を小さくするほど低下していくが、熱効率は副室噴孔総断面積が 20 mm² で最大値となり、それより大きくても小さくても熱効率は低下する。これは副室噴孔総断面積が小さいほど副室の圧力上昇が高く主室へ供給される熱エネルギーが増加し燃焼安定性が確保できるためである。そのため、同等の燃焼安定性を確保する際に点火時期を遅角化することが可能となり、筒内最高温度が低下し NO_x 排出量を低減できる。熱効率の変化に対しては、副室噴孔総断面積が大きすぎると副室の圧力上昇が低く副室から主室へ供給

Fig. 6 Comparison of pre-chamber volume on NO_x and thermal efficiencyFig. 7 Comparison of NO_x and thermal efficiency by total nozzle cross-sectional area

される熱エネルギーが低下する。そのため、AFR 35 の運転条件で燃焼安定性の維持ができなくなり HC が増加するため熱効率は低下する。一方で副室噴孔総断面積が小さすぎると AFR 35 の運転条件での燃焼安定性を確保するのに必要以上に副室圧力上昇がおき、副室から主室へ供給される熱エネルギーが増加する。それにより副室での冷却損失増加の影響が大きくなり熱効率が低下すると考えられる。一方で $dP/d\theta$ は副室から主室へ供給される熱エネルギーが増加すると急激な燃焼となるため高くなる。以上の性能結果から、副室噴孔総断面積設定は NO_x 排出量および $dP/d\theta$ が目標数値以下であり、熱効率最大となる 20 mm^2 とした。具体的な設計値は、副室噴孔数は 10 孔、副室噴孔径は $\phi 1.6 \text{ mm}$ の設定とした。

副室設計の最適化をおこなった後の各性能を Fig. 8 に示す。Fig. 8 はエンジン回転数 2000 rpm, IMEP 810 kPa, の高負荷運転条件における AFR に対する性能結果を示している。正味熱効率の算出には正味熱効率 45% を達成した研究と同様に直列 4 気筒エンジン相当のメカニカルフリクションおよび 1 次元シミュレーションにより推定した過給機損失を用いた。燃焼安定性は AFR 38 まで CPmi 3% 以下を達成し、AFR 30 以上の条件において MBT 運転を実現している。

4.3. 副室における冷却損失の低減技術

副室内燃焼は比表面積 (S/V 比) が大きいために、壁面への冷却損失が高くなる可能性が考えられた。そのため、熱

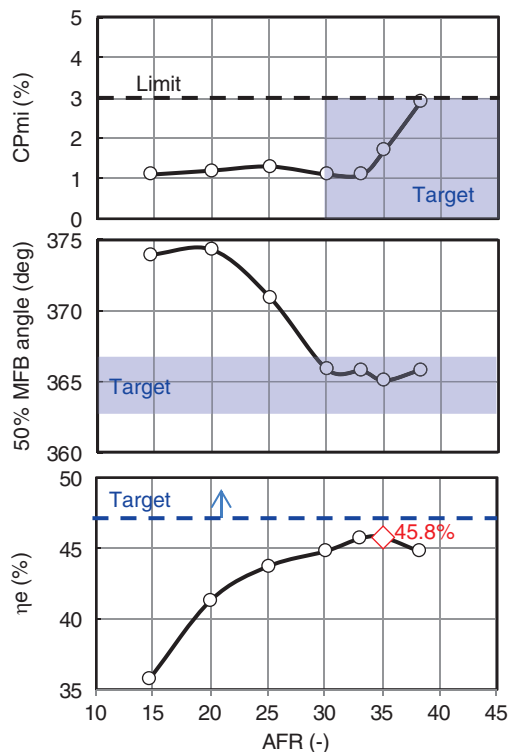


Fig. 8 Lean characteristics under heavy load

効率の向上のために副室内の冷却損失の低減に取り組んだ。冷却損失低減を目指し副室内壁に Fig. 9 に赤色で示す部分への断熱材のコーティングをおこなった。また、副室内表面積に対するコーティング部の割合は 37% である。エンジン回転数 2000 rpm, IMEP 810 kPa, AFR 35 の運転条件におけるコーティングの影響を Fig. 10 に示す。それにより、冷却損失低減効果とそれに付随する主室への熱エネルギー量の増加により未燃損失の低減効果が得られ、熱効率が 0.5 ポイント向上する結果となった。また、ノッキングに対する影響がなかったため時間損失は変化がなく、廃熱は上記損失低減分のすべてが熱効率向上とならないため廃熱も同時に増加した。

4.4. 燃焼室 S/V 比設定

副室ジェット燃焼エンジンにおいては、同一圧縮比の一般的なガソリンエンジンに比べて、燃焼室の S/V 比が増加する。また副室容積が同一の場合、圧縮比が高いほどその影響は大きくなる。そのため、圧縮比と燃焼室の S/V 比の関係について検討した。Fig. 11 に圧縮比と S/V 比の比較テストから得られた熱効率感度マップを示す。図中の Step 1 として、燃焼室の S/V 比の影響を確認するため、圧縮比を低下させることによる燃焼室の S/V 比低減の性能を確認した。その結果、圧縮比低下により理論熱効率は低下する一方、冷却損失、未燃損失の低減効果が大きく逆に熱効率が向上する結果が得られた。また図中の Step 2 として、燃焼室形状を最適化し燃焼室の S/V 比のさらなる低減を

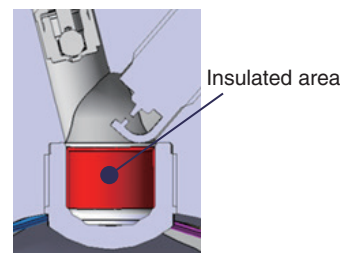


Fig. 9 Insulated area of pre-chamber

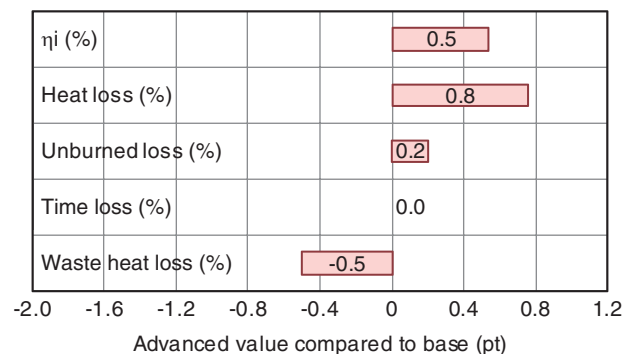


Fig. 10 Effects of coating on pre-chamber

図り熱効率を向上させた。以上の結果から、副室ジェット燃焼エンジンの圧縮比設定は燃焼室形状の見直しを含めて圧縮比 16 とした。

4.5. 筒内流動設定

先の研究で正味熱効率 45% を達成したエンジンは火炎伝播速度向上を目的として高タンブルポートを採用していた。しかし、副室ジェット燃焼では燃焼形態が変化するため要求される筒内流動が変化することが考えられた。そのため、副室ジェット燃焼における最適な筒内流動の選定をおこなった。タンブル比の異なる二つのポート仕様で性能を比較した結果を Fig. 12 に示す。ポート A のタンブル比は 0.4、ポート B のタンブル比は 1.8 で、エンジン回転数 2000 rpm、IMEP 510 kPa 運転条件で比較した結果である。タンブル比の違いによる燃焼期間の変化はなく、タンブル

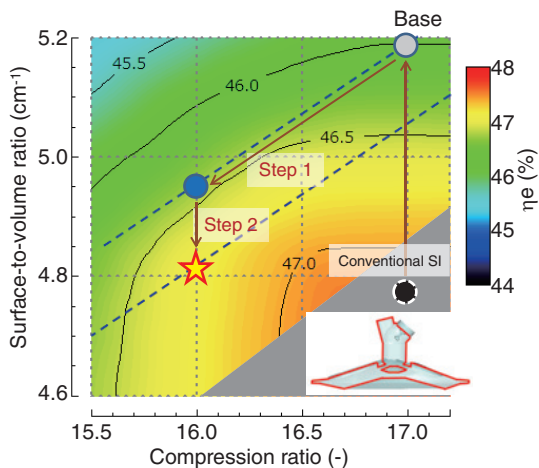


Fig. 11 Effects of surface-to-volume ratio and compression ratio on brake thermal efficiency in pre-chamber jet combustion engine

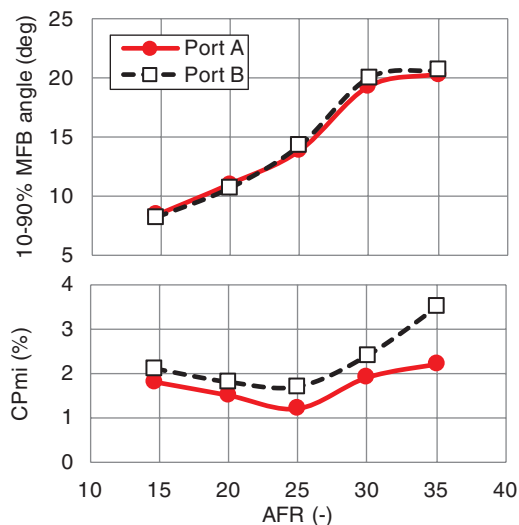


Fig. 12 Performance results for intake ports with different tumble ratios

比の高いポート B の仕様では燃焼安定性が低下することがわかった。燃焼期間に変化がない理由として副室ジェット燃焼では、点火プラグは副室内にあるため、通常 SI エンジンのように流動強化による初期火炎核の成長促進効果が得られないためと考えられる。次に燃焼安定性低下解析のため CFD による筒内流動解析した結果を Fig. 13 に示す。この図は圧縮行程、副室へ燃料噴射後のクランクアングル 80 deg BTDC における筒内流速分布を示している。ポート A では、主室と副室のガス交換がほとんどないのに対して、ポート B ではタンブル流れが残っており主室と副室のガス交換がおこなわれていることがわかる。副室内に留まらせるために圧縮行程で副室内専用 DI インジェクタにより噴射した燃料が、この残存するタンブル流れにより主室へ流れ、燃焼開始時の副室内燃料量がサイクルごとに変化する。その結果、サイクルごとに副室から主室へ供給される熱エネルギーの変動により、主室の燃焼もサイクルごとに変動し燃焼安定性が低下すると考えられる。以上の結果から、副室ジェット燃焼の筒内流動はタンブル比の低いポート A 仕様とした。

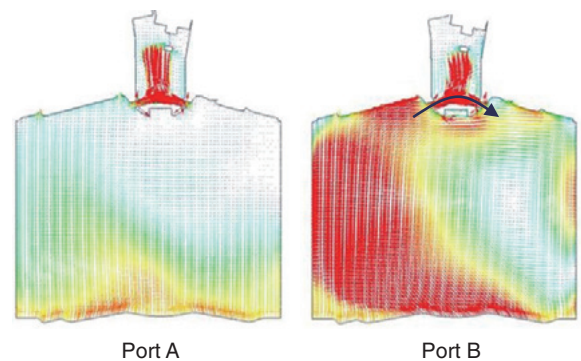


Fig. 13 In-cylinder flow with CFD at crank angle of 80° BTDC

5. 検証結果

ここまで述べてきた副室ジェット燃焼エンジンの対応技術をすべて適用した単気筒エンジンにおいて最終達成値を確認した。最終仕様のエンジン諸元を Table 2 に示す。正味熱効率は 45% を達成した研究と同様に直列 4 気筒エンジン相当のメカニカルフリクションおよび 1 次元シミュレーションにより推定した過給機損失を用いて算出した。

Fig. 14 にエンジン回転数 2000 rpm、IMEP 870 kPa の高負荷運転条件における AFR に対する各性能を示す。燃焼安定性は AFR 40 まで CPmi 3% 以下を達成し、AFR 35 の条件において MBT 運転を実現することで正味熱効率は 45% に対して 2 ポイント向上を達成した。また、同時に正味熱効率向上を達成した AFR 35 の条件において、その

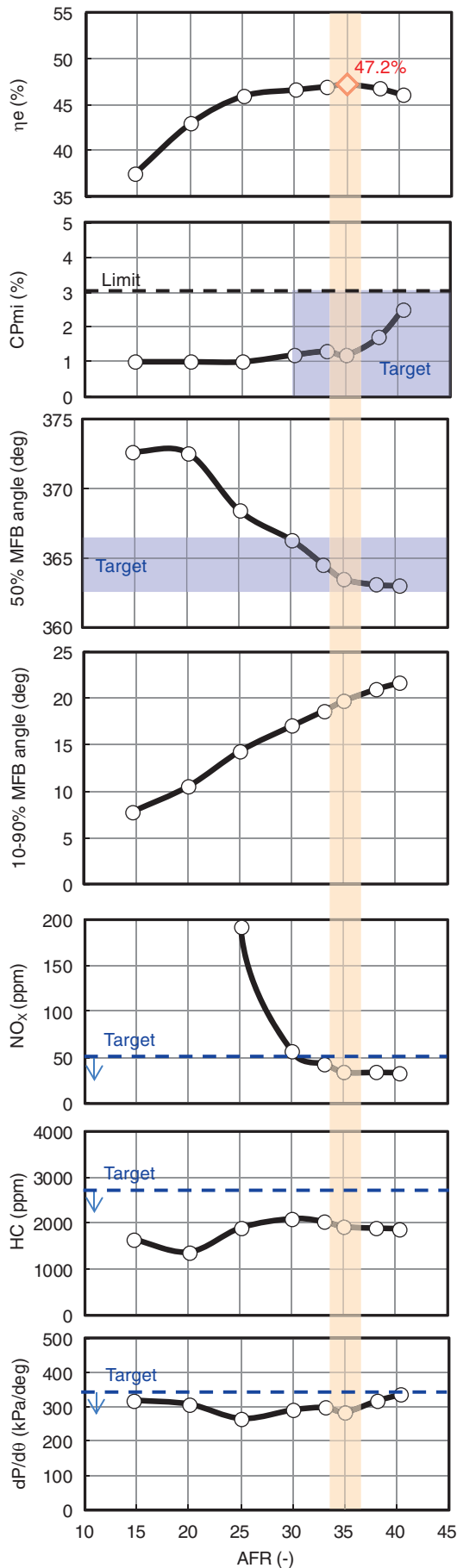


Fig. 14 Lean characteristics at high load with final test engine specifications

Table 2 Final test engine specifications

Number of cylinders	1
Engine type	DOHC 4-valve
Displacement volume (cm ³)	458
Bore (mm)	φ 73
Stroke (mm)	109.5
Stroke/bore ratio	1.5
Expansion ratio	16.0
Effective compression ratio	12.5
Pre-chamber volume (cm ³)	2.0
Nozzle diameter (mm)	φ 1.6
Number of nozzles	10
Pre-chamber specification	Thermal insulation coating
Intake port	Weak flow
Aspiration	Supercharger
Fuel supply (main/pre)	PI/DI
Ignition energy (mJ)	60

他の目標性能である NO_x 排出量は 30 ppm, HC 排出量は 2000 ppm, CP_{mi} は 1.2%, dP/dθ は 300 kPa/deg を達成した。

Fig. 15 にエンジン回転数 2000 rpm における各負荷に対する正味熱効率を先の研究で正味熱効率 45% を達成したエンジンと比較した結果を示す。正味熱効率は、最大となる負荷条件以外においても向上していることが確認された。

本研究で得られた成果は単気筒エンジンにおけるものである。今後はこれらの成果を適用した自動車用の多気筒エンジンの実用化に向けて、部分負荷と出力点運転を両立する過給システム開発およびリーン燃焼に対応した専用触媒の開発をおこなっていく。

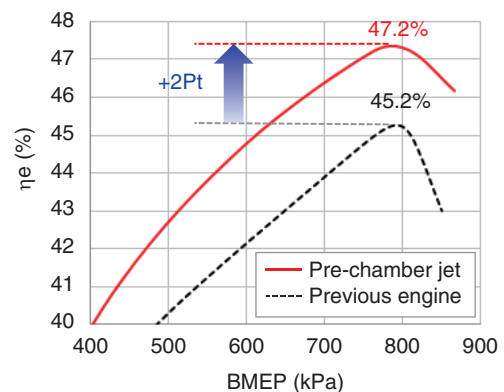


Fig. 15 Achieved brake thermal efficiency at engine speed of 2000 rpm

6. まとめ

機械圧縮比 16 の単気筒ガソリンエンジンに副室ジェット燃焼を適用し、副室設計の最適化および副室の追加に起因する各損失の低減をおこなった。その結果、エンジン回転数 2000 rpm, IMEP 870 kPa, AFR 35 の運転条件において以下に示す性能を達成した。

(1) 目標正味熱効率

45% 達成技術に対して 2 ポイント向上

(2) SULEV20 達成のための目標エミッション

フィード NO_x 排出量は 30 ppm

フィード HC 排出量は 2000 ppm

(3) 実車の振動騒音要求

AFR 40 まで CPmi 3% 以下

dP/d θ は 300 kPa/deg

参考文献

- (1) 田岸龍太郎, 池谷健一郎, 高沢正信, 山田健人: ガソリンエンジンの正味熱効率 45% 達成技術, Honda R&D Technical Review, Vol.27, No.2, p.1-10
- (2) Hanabusa, H., Kondo, T., Hashimoto, K., Sono, H., Furutani, M.: Study on Homogeneous Lean Charge Spark Ignition Combustion, SAE Technical Paper, doi:10.4271/2013-01-2562, (2013)
- (3) Nakata, K., Nogawa, S., Takahashi, D., Yoshihara, Y., Kumagai, A., Suzuki, T.: Engine Technologies for Achieving 45% Thermal Efficiency of S.I. Engine, SAE Technical Paper, doi:10.4271/2015-01-1896, (2015)
- (4) 甲田豊, 菅波友二, 小林裕幸, 小川賢: 高性能・低エミッション 2.0L 直噴ガソリンエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.1, p.39-46
- (5) Takeori, H., Wada, K., Matsuo, Y., Morita, T., Konomoto, T., Murata, Y., Kimura, M., Miyauchi, A.: Study of an Aftertreatment System for HLSI Lean-burn Engine, SAE Technical Paper, doi:10.4271/2018-01-0945, (2018)

■ 著 者 ■



小林 広 樹



甲 村 公 典



中西 啓 太 朗



大 田 篤 志



鳴 海 裕 樹



竹 形 徳 之