



単気筒試作エンジンを用いた性能開発 ～エンジン性能最適化のための燃焼システム改善～

Performance Development with a Single-cylinder Engine
– Combustion System Improvement for Optimizing Engine Performance
岩田 良文

Abstract

In recent years, many 4-stroke outboard motors have been developed in response to market demand. Because of the complicated engine structure of a 4-stroke, however, they tend to be larger and heavier than a 2-stroke outboard. Contrary to this tendency, an outboard motor by nature should be lightweight and compact so that it does not detract from the inherent character of the boat it is mounted on. In addition, due to the nature of boat use, an outboard needs to deliver a high level of torque in the mid-speed range. In this kind of high-load use in the mid-speed range, knocking can be a factor limiting specific torque (torque/liter). In this research we used the latest analysis and developmental technologies to attempt to improve performance on a single-cylinder prototype engine by improving combustion characteristics. Here we report on the process and results of our performance development project.

要旨

近年、市場の要求から、多くの4ストローク船外機が開発されてきている。しかし、4ストローク船外機は、その複雑なエンジン構造上、従来の2ストローク船外機に比べて、大きく、重くなりがちである。一方、船外機は、それを装備するボートの特性を損なわないように、軽量・コンパクトであることが要求される。加えて、船外機には中速での高いトルクが要求される。このような中速高負荷の条件では、ノッキングがリッタートルクを制限するひとつの要因である。我々は、単気筒試作エンジンを用い、最新の解析、開発技術を用いて燃焼改善による性能向上を試みた。

1 はじめに

商品としての船外機には、小馬力のものを除いて、多気筒のエンジンが使用される。しかし、多気筒エンジンを用いての基礎的燃焼開発では、気筒毎の吸・排気特性の差、気筒間干渉の影響等による解析要因の増大、測定点数の増大、試作部品点数の増大により、開発に多くの工数を要することになる。このため、今回は単気筒エンジンを試作し、基礎的性能開発を行った。この開発を通じて、船外機用4ストロークエンジンの出力密度向上を目的として、燃焼システムを改善した。本開発においては、エンジンの性能開発に適用される最新の開発プロセスを体系的に適用することで、出力密度を向上する可能性を見出すことができた。本報では、以下の項目について記す。

- ・ 各解析に用いた手法について
- ・ 解析と最適化のためのシミュレーションの適用について
- ・ 仕様の改善の方向性について
- ・ 仕様変更の内容について
- ・ エンジン試験と設計目標確認について

- ・ 最終仕様と最終達成性能について

2

開発概要

2.1 開発ツール

今回の開発には、次のようなツールを用いた。

(1) 1-D(1次元)シミュレーション解析

- ・ 3-D(3次元) CFD(Computational Fluid Dynamics)シミュレーション解析のための境界条件取得
- ・ 体積効率向上を目指した仕様検討

(2) 3-D CFDシミュレーション解析

- ・ 吸気ポート内流れ解析
- ・ 混合気形成解析
- ・ 筒内残留ガス分布解析
- ・ 筒内混合気濃度分布解析
- ・ 筒内空気流動解析
- ・ 火炎伝播解析
- ・ ノック性向解析
- ・ 排気流れ解析

(3) 火炎トモグラフィック(断層)解析(光ファイバーを埋め込んだヘッドガスケットを用いた実機の火炎観測)

- ・ CFD解析結果の検証
- ・ 火炎伝播把握
- ・ ノック発生位置解析

(4) ポートフローテスト

- ・ 流量係数
- ・ 静的筒内流速分布解析
- ・ タンブル比解析

(5) インジェクター噴射コンポーネントテスト

- ・ 噴霧壁面付着解析

2.2 開発手法と改善の概要

本開発の中で上記開発手法をどう用いたか、概要を以下に記す。

(1) 吸気システムの解析と最適化

吸気システムの解析と最適化は、1-Dの流体力学解析と3-DのCFD解析を用いて行った。この1-D、3-Dシミュレーション利用による改善策は、吸気管、ポート形状、および、吸気・排気カムタイミングの仕様変更反映した。吸気系の形状・寸法の変更は、壁境界流の剥離を最小にすること、および、吸気2ポート(吸気2バルブ)の対称な流れ、吸気バルブ上流におけるインジェクター位置・噴霧方向を最適化するこ

とをねらった。実機開発の手段は、静的フローテストによって行い、評価はトータルマスフローと、フローテストにおける筒内シリンダー直角断面の空気流れ分布計測によって行った。

(2)混合気形成

混合気形成最適化のためのインジェクター位置、方向、噴霧の選定は、ラピッドプロトタイピングによる樹脂製ポートとインジェクターを組合せたコンポーネントテストにより行った。

吸気ポートを対称形に変更することで、最適なインジェクター位置選択が可能となった。インジェクターからの2つのスプレーが、吸気通路の内壁と両バルブの間の領域をよくカバーするように、インジェクター仕様（噴霧角、噴射角）を選択した。これと平行して、噴霧の衝突、特に吸気ポートの上流部分のポート壁面への噴霧の衝突が最小となるように、インジェクター位置、および、向きを最適化した。改善の結果は、吸気ポートへの噴霧の広がり、エンドスコープによる高速度撮影にて観察し評価した。

(3)燃焼改善

燃焼の解析、および、改良は、3-D CFD解析、および、火炎トモグラフィー計測を利用して実施した。

ピストンおよびシリンダーヘッドの表面は、エンドガス領域が早く燃焼するよう、中央からの良好な火炎伝播が得られるように最適化した。変更はスキッシュエリアも含めて行っている。結果は、火炎前炎のトモグラフィー計測、および、火炎トモグラフィーによるノック限界条件で運転でのノック中心検知によって解析した。最適化はCFDによる燃焼解析と、燃焼システム変更による火炎伝播の変化を直接トモグラフィー計測することで達成した。

2.3 改善のねらい

精査に図面検討を行い、改善効果が得られる可能性のある箇所として、以下の項目をピックアップし、以下のねらいで改善形状を検討した。

- ・ 吸気マニホールドからポートにかけての形状

ねらい： 吸気流れの剥離防止による体積効率向上、

燃焼の安定化と燃焼効率向上のための筒内タンブル流れ最適化

- ・ カムプロフィルと可変タイミング

ねらい： 残留ガス低減と体積効率向上のための最適化

- ・ インジェクタータイプ・位置

ねらい： 速やかな燃料蒸発が得られる燃料噴霧と空気の混合、および最小限の燃料壁面付着

— 最大の予混合燃焼割合（出力密度、燃費、および、排気エミッションに影響）

— 速やかな過渡応答

- ・ 燃焼室形状

ねらい： ノック限界における出力密度向上

— エンドガスを早く燃やすための火炎伝播

— ホットスポットによる着火を避けるための一様なエンドガス温度

3 改善内容

3.1 体積効率改善

単気筒試作エンジンの設計ベース仕様を図1に示す。図1はスロットルバルブ位置、インジェクター、吸気管、ポート形状の詳細、燃焼室形状、排気ポート、そして排気マニホールド形状を示す。改良案は、製造可能な形状、および船外機レイアウト上の制約を満足する範囲内での検討とした。

吸気系解析は、吸気マニホールドとポート断面積の1-Dシミュレーションによるガス交換計算、バルブとピストンの運動力学、および、0-Dの燃焼モデル解析をベースに行った。1-Dシミュレーション解析による改善検討を行った最終結果を図2に示す。

カムに関しては、カムタイミングおよびカムワークアングル変更の効果について検討した。検討の結果、試作エンジンベース仕様に対し、カムワークアングルの変更は体積効率向上効果が得られないと考えられた。カムタイミングに関しては、特に吸気カムタイミングを可変とすることで、かなり体積効率を向上させることができるシミュレーション結果を得た。吸気カムの可変タイミング幅40°が体積効率向上に有効であることが明らかとなった。このシミュレーションを用いた改善検討の結果は、体積効率が約10%向上することを示している。1-Dシミュレーションによる体積効率改善のための変更は以下である。

- ・ 吸気マニホールドの長さや径
- ・ バルブタイミングとカム形状
- ・ 可変バルブタイミングの効果

また、3-D CFD解析の結果から、以下の項目を体積効率向上の可能性のある箇所としてピックアップし、改良仕様に織り込んだ。

- ・ 吸気ポート形状、対称形状ポート
- ・ インジェクター位置
- ・ 燃焼室への流入部形状
- ・ 吸気バルブ部の流れ

以上が体積効率向上による性能向上分で、これ以上の改善は、燃焼効率の改善によって導き出すものである。高い燃焼効率は、筒内の乱流を最適化することにより得られる早い燃焼速度の効果と、燃焼

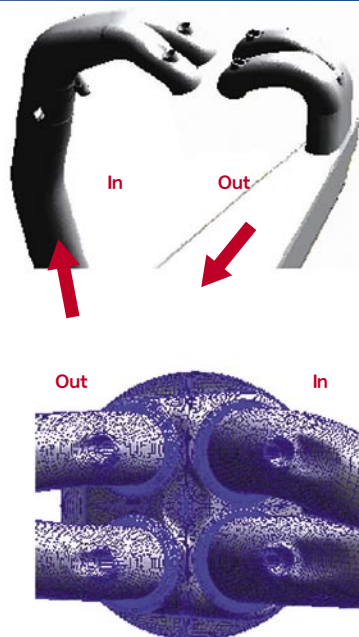


図1 単気筒エンジンの設計ベース仕様

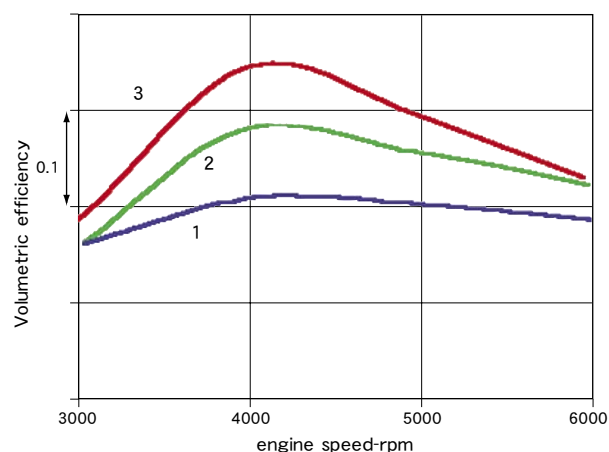


図2 Volumetric efficiency for baseline(1) and improvements achieved with geometry variation(2) and variable cam phasing(3)

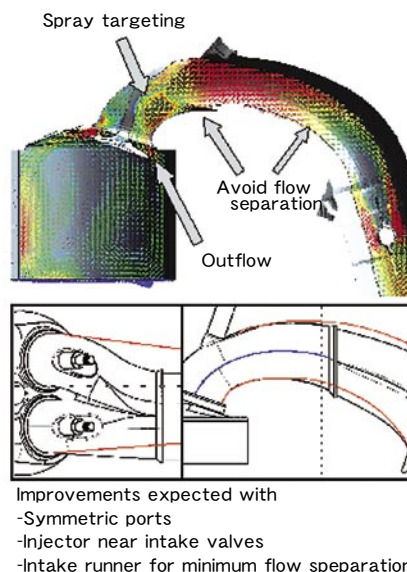
タイミングを最適化することで得られると考えられる。しかし、このように望む燃焼改善ができるか否かは、いかにノック限界近くで運転できるかどうかにかかっている。

3.2 燃焼改善

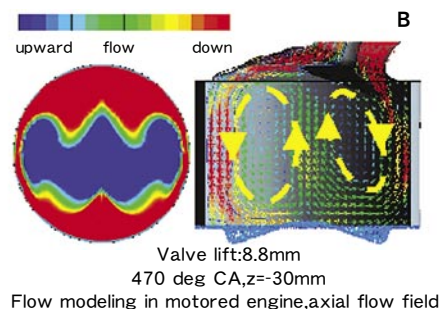
3.2.1 吸気マニホールドと対称ポート

試作ベース仕様の吸気ポートは図1に示すように非対称であったが、ポートを対称形状(図3a参照)とすることによって、スペースを最大限に利用することができるようになり、良好な流れとなる断面形状をとることが可能となった。スムーズなつながりのカーブ断面とすることで、吸気流の剥離と渦発生の可能性が低減し、良好な流れ断面が得られる。シリンダーへの流入部を対称形状とすることで、インジェクター位置を吸気バルブ近くに位置することができ、吸気2バルブの両ポートに、均等に燃料を供給することができる。この形態とすることで、筒内に均一な混合気を供給するのに最良の状態となる。このインジェクター位置とすることで、燃料の壁面付着を最小にする噴霧方向にすることができる。燃料の壁面付着を最小にすることが、燃焼を安定させ、また回転や負荷の変化に対する速やかな応答に効果的である。

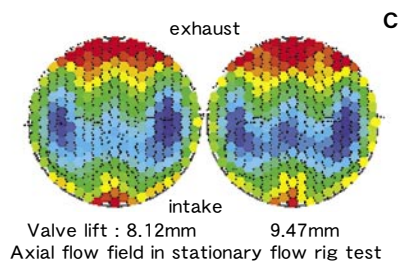
吸気流れの図(図3b)から、ポート形状変更(対称形状への変更)の結果を見ることができる。シリンダー軸直角断面での速度分布は静的フローテストにて計測した。バルブリフト8.12mmおよび9.47mmの試験結果を図3cに示す。ポート形状変更の結果、筒内の流れが対称となっていることが確認された。



a. modifications for symmetric port design



b. CFD flow analysis



c. stationary flow test results



図3 吸気マニホールドと対称ポート

3.2.2 インジェクター位置

最終的に選択したインジェクター位置、および、噴霧方向を図4に示す。CFDに基づくインジェクター噴霧方向変更の結果をエンドスコープによるスプレー観察で検証した。図4の噴霧写真に見られるように、幾何的に良好な構成となっていることが見て取れ、設計検討とCFDシミュレーションが示す噴霧方向が、良好な結果になっていることを示している。さらに、インジェクター位置をバルブに近づけることにより体積効率を阻害する要因を排することができる。

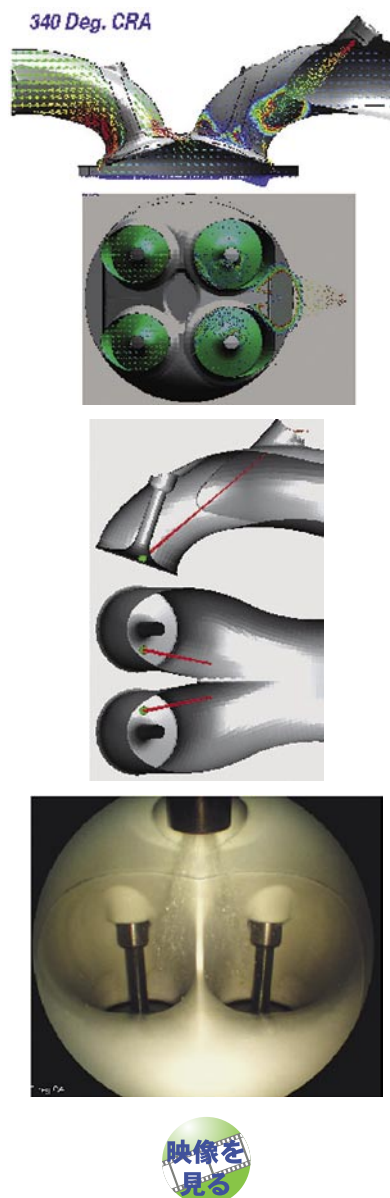


図4 Injector arrangement and spray targeting

3.2.3 燃焼室形状変更

設計ベース仕様では4箇所のスキッシュエリアを設けていた。この吸気側、排気側、クランク軸方向の4箇所に設けたスキッシュエリアは、ピストンのバルブポケットとピストン中央のドームからなるピストン頂部形状と、形状的には合っている。しかし、図5に示す、CFD解析結果は、スキッシュエリアに囲まれる角4隅の領域と、バルブポケットへの火炎速度を上げることによって燃焼の改善が得られることを示している。バルブとピストンの衝突を防ぐための、4つの深いバルブポケット部で、空気流動が弱くなり、火炎伝播速度を遅くしている。

最終仕様(図5)では、クランク軸方向のスキッシュエリアは取り止めとし、バルブポケットをできるだけ削減してピストン頂部の形状を基本的に平らとした。対称形にした吸気ポート形状と合わせて、結果としてねらいとする改善効果を得ることができた。

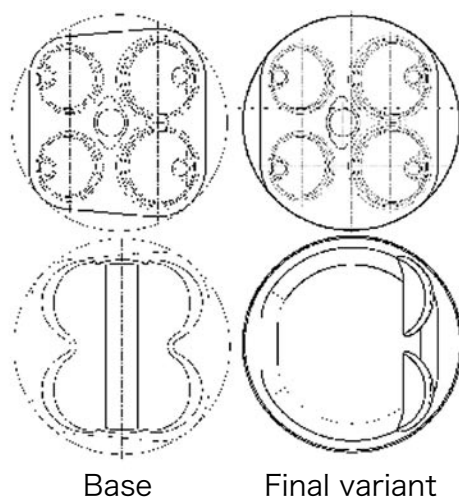


図5 Squish area and piston top design variants

4 改良仕様の検証

4.1 体積効率

体積効率の向上は、次の項目から得られた。

- (1) 吸気管の長さとの最適化
- (2) 対称ポート形状とポート曲がり改善
- (3) バルブシート出口の流れ形状改善
- (4) 可変バルブタイミング

静的フローテストで得たポートの流量係数を図6に示す。この結果は、設計ベース仕様の流れのレベルは良好であること、および、上記の幾何学的変更による改善効果を示している。

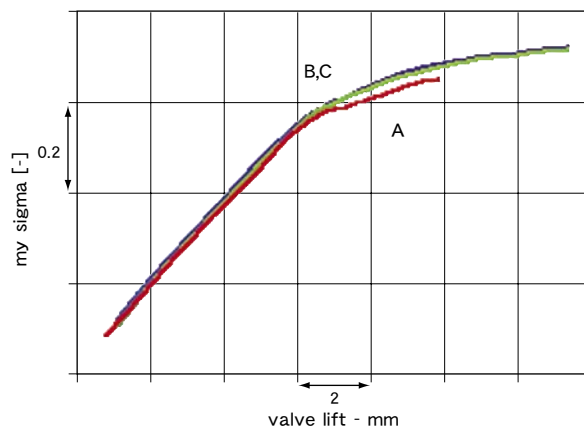


図6 Port flow coefficient data(my sigma) for A:baseline,B,C port and combustion chamber modifications

4.2 対称な火炎伝播

単気筒試作エンジンにて、ファイバーを埋め込んだガasketにより、火炎伝播を測定した。これが、火炎トモグラフィ（断層）観察写真による解析である。

改善仕様の中速・部分負荷における火炎伝播変化の、実機火炎トモグラフィ（断層）写真データを

図7に示す。初期設計仕様は、著しい非対称の火炎伝播を示している。この原因は、設計ベース仕様の非対称の吸気ポートが作り出す筒内の非対称空気流れによるもので、これは吸気ポートを対称形状に改良することで大幅に改善されている。この改善した、火炎伝播が対称であることそのものが、良好な性能を得るために必要なものではない。しかし、この対称な火炎伝播が複雑さを排し、結果として、全エンジン作動領域で良好な筒内流れと燃焼特性を利用できるようにしている。

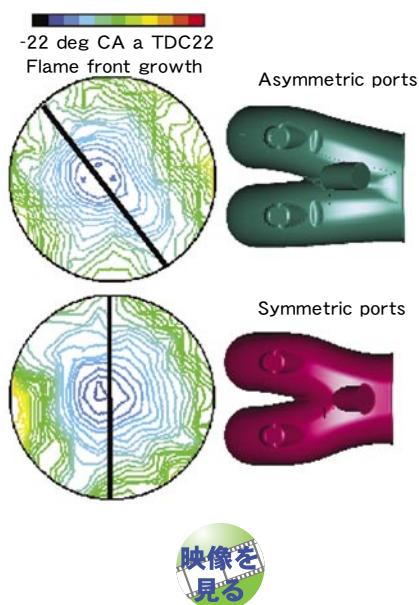


図7 Modification effects on flame propagation at 3,000rpm, 6bar IMEP.Flame tomography measurements with VisioTomo

4.3 全開性能

3,000～6,000rpmにおける初期仕様、および最終仕様のWOT(Wide Open Throttle) BMEP (Break Mean Effective Pressure:軸平均有効圧) データを図8に示す。最終仕様のBMEPは初期仕様と中間仕様を0.5～1 bar上回る。この改善効果は、体積効率向上、混合気の均一性改善、残留ガスの

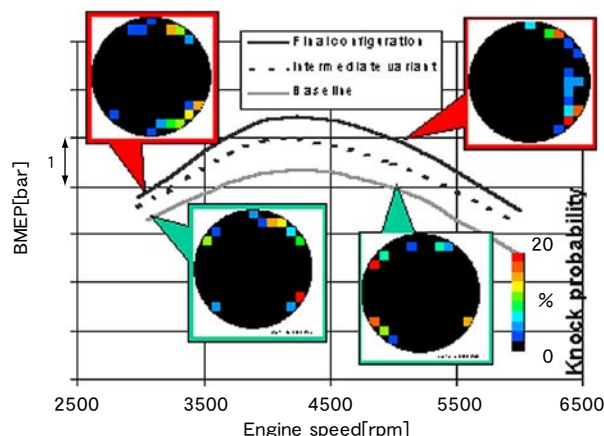


図8 Single cylinder full load operation analysis

分布改善の組み合わせ、および、良好な燃焼効率とノック改善の結果である。特に、ベース仕様の火炎トモグラフィによるノック発生箇所の解析では、排気側にノックの起点が見られた(図8の3,000および5,000rpm参照)。このベース仕様の解析結果から、筒内空気流れ改造のねらいは、排気側の高温に誘起される自己着火の前にエンドガスを燃焼させるよう、排気側への火炎伝播を高めることになる。上述の変更で、このねらいを達成することができる。

最終仕様をノック限界で運転したときの火炎トモグラフィの解析結果を図9に示す。BMEPが大幅に向上したにもかかわらず、自己着火は吸気側で起きている。図9に見られるように、4,000rpm WOTの運転状態の比較から、最終仕様の効果は以下の項目から得られる。

- ・ 筒内混合気の不均一の低減(狭い空燃比幅)
- ・ 筒内残留ガスの片寄りの減少
- ・ 排気側およびクランク軸方向への早い火炎伝播

最終仕様でも、吸気スキッシュエリアの両端に、ノッキング発生確率が高いことを示している。これらのノック発生領域の、特に高いエンドガスのピーク温度を低減させるよう、局所の空気流動を高めることで、さらに改善効果を得られる可能性がある。

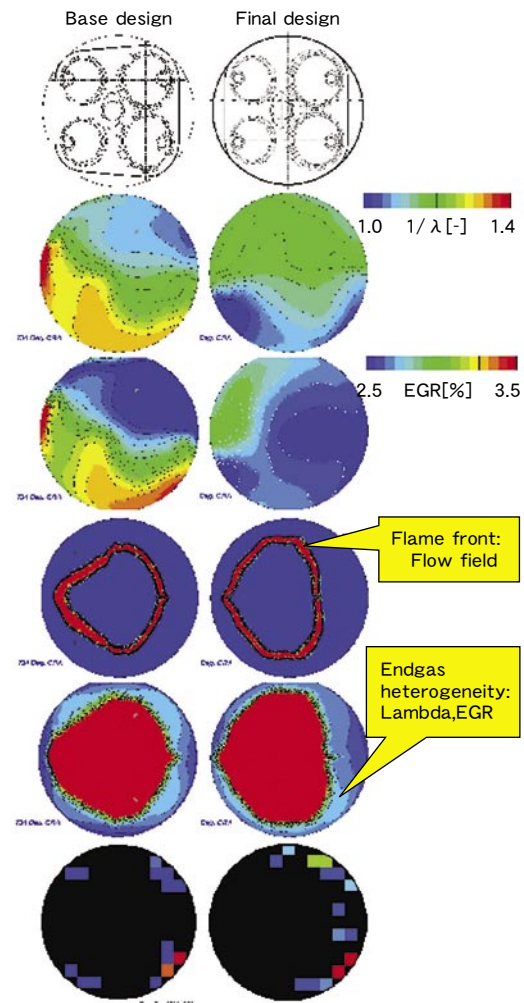


図9 Combustion analysis at borderline knock at 4,000rpm

5 まとめ

5.1 解析技術

本報に記述した開発では、以下の技術を広範囲に利用した。

- ・ 一般的な性能および排ガス測定
- ・ 吸気マニホールド、シリンダー、排気マニホールド圧力測定を含めた熱力学解析
- ・ ファイバー埋め込みガスケットによる火炎トモグラフィ(断層観察)解析
- ・ 静的フローテスト、総合ポート流れ、軸方向流れ分布のための数値解析
- ・ 1-Dガス交換、および、0-D燃焼モデルによるシミュレーション解析
- ・ 流れ、乱流、燃焼の3-D CFDシミュレーション解析

5.2 エンジンの状況

最終的に、体積効率の改善と、燃焼効率の改善によって、単気筒試作エンジンの性能改善を達成した。これは、徹底した流れ幾何学と流れの燃焼への影響を解析し最適化した結果による。エンジンの変更項目は以下の内容である。

- ・ 燃焼室スキッシュエリアおよびピストン頂部形状
- ・ 吸気マニホールドおよびインジェクター位置・方向
- ・ 吸気ポート形状
- ・ 可変カムタイミング

これらの変更の目標性能への効果を図10に概観する。

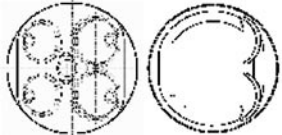
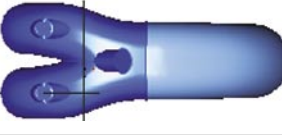
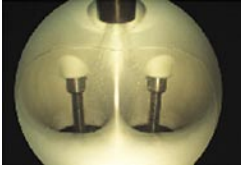
	combustion chamber and piston	less knocking: piston surface modified squish area design, better outflow at valve seat area increase volumetric efficiency ~ 2%
	port / manifold: symmetrical	less knocking: better charge distribution and in-cylinder flow smoother curvatures increase volumetric efficiency ~ 1.5%
	injector near intake valve	less knocking: better fuel distribution less wall film • less HC emission • faster combustion • better dynamic response
Squish gap: 1mm		less knocking: flame propagation after TDC
All modifications combined		BMEP improvement up to 1 bar in wide rpm range

図10 Design elements and their benefits for the target configuration

6

おわりに

本報の、単気筒試作エンジンを用いた性能開発は、AVL社(Graz, Austria)との契約により、共同で開発および試験を実施したものである。ここに、論文作成にご協力いただいたAVL社のWinklhofer氏、Spanner氏に謝辞を表します。

■参考文献

- 1) R. Glanz: "Differential measurement of tumble flow", MTZ Motortechnische Zeitschrift, 61(2000)1.
- 2) H.M. Koegeler, G. Regner, T. Sams, K. Gschweitl: "Using simulation and optimization tools to decide engine design concepts", SAE2000-01-1267
- 3) E. Winklhofer, Ch. Beidl, H. Philipp, W. Piöck: Micro-Optic Sensor Techniques for Flame Diagnostics, JSAE20015301.
- 4) R. Tatschletal: "CFD in IC engines spray and combustion simulation-current status and future development", WCCMV-fifth world congress on computational mechanics, July 7-12, 2002, Vienna, Austria, Eds.: H. A. Mangetal.

■著者

岩田 良文 Yoshibumi Iwata
ヤマハマリン株式会社 第12技術部