

〈特別寄稿〉

ボア壁温分布改善用ウォータージャケットスペーサ

トヨタ自動車株式会社 パワートレーン開発本部 エンジン統括部 中田 高 義

1. 背景

地球温暖化への対策から、国内のガソリン新燃費規制（2010年）¹⁾ や欧州での二酸化炭素排出自主規制（2008年）²⁾ など各国で規制が強化されている。更に燃料価格の高騰から、ユーザーニーズ自身も小型車や低燃費車中心になってきている。エンジンの燃費向上技術の中で、フリクションの低減は重要であり、中でもピストン系のフリクションはエンジン全体の3～4割³⁾⁻⁵⁾を占め、従来から数多くの低減手法が提案されている⁶⁾⁻⁸⁾。それらの手法の一つとして、シリンダボア壁の温度を上げ、ボア壁面に付着するオイルによるフリクションを減らす手法がある。例えば、シリンダブロックの冷却をシリンダヘッドと分離した2系統冷却⁹⁾や、ブロックのよども冷却の技

術が実用化されている。これらに対して、ウォータージャケット（以下W/J）内の冷却の過剰部位に設置する事で、シリンダボア壁の温度分布を改善するという、ウォータージャケットスペーサ（以下スペーサ）を開発して量産化してきている。最初に実用化したスペーサ¹¹⁾は、2002年12月にクローズドデッキ構造のエンジンに、感熱膨張シートを応用したものであったが、エンジン側もスペーサ側も多くの制約があった。本稿では、オープンデッキ構造のエンジン用に開発した、より汎用的なスペーサの概要を紹介する。

2. 開発のねらい

2.1 理想のボア壁温分布と冷却

ボアとピストンリングとの潤滑状態は、上死点

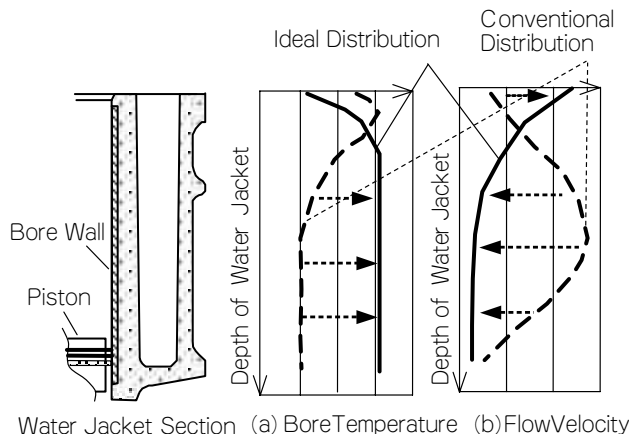


図1 Ideal Bore Temperature Distribution

付近ではオイル量が不足した境界混合潤滑域であり、ボアの中央部から下死点まではほぼ流体潤滑域である^{12) - 17)}。そこで、フリクションを下げる為には、ボア上部側では、ボア壁に付着するオイルの蒸発抑制とより高い粘度の維持が可能なボア壁温度の低減が望ましい。一方、ボア中央部から下部側では、余分な油膜が出来ないようにオイル粘度を低くすることができる、ボア壁温度の上昇が有効となる。このような最適な壁温分布を達成する手段として、W/J内の冷却水の流速分布を改善する方法が考えられる。

図1に、縦方向のシリンダ断面におけるシリンダボア壁の温度（以下ボア壁温）とW/J内冷却水の流速分布の各イメージを示す。ここで、ボア壁温分布（図1 (a)）は、ピストンが摺動するシリンダライナ表面の温度をボア深さ方向に示したものである。流速分布（図1 (b)）は、断面上の流速ベクトルを同じくボア深さ方向に示したものである。いずれの図も、破線は従来エンジンの分布、実線は理想的に最適化された分布の各イメージを表す。

図示した様に、従来エンジンのボア壁温は、ボアの上部で高く中央部から下部では低い傾向となっている。これは、冷却水の流速があまり冷却を必要としないボアの中央付近で最も速く、逆に冷却したいボア上部では遅くなっているた

めである。従って、前述の理想的な壁温分布実現のためには、ボア上部では壁温低減のため冷却水流速を速くし、中央から下部では過剰な冷却防止のため流速の適度な抑制をおこなう必要があることが判る。

2.2 スペーサによる流速分布の改善

冷却水をW/J上部へ集中させるという理想的な流れの実現手法として、W/J自体の形状を変更するという方法は当然考えられるが、種々の制約もあった。例えば、W/J自体を浅底化する手段は、本来熱負荷の低いボア下部であっても壁温が高くなり易い上、排気量や出力等の変更が必要になった時に最適化しにくいこと等も考えられる。次に、W/Jの通路幅を上部で広く下

表1 Specifications of Engine

Cylinders / valves	V6 / DOHC 24
Bore / stroke (mm)	87.5 × 83.0
Displacement (cc)	2,994
Compression ratio	11.5 : 1
Fuel	Premium gasoline
Fuel supply	Direct injection

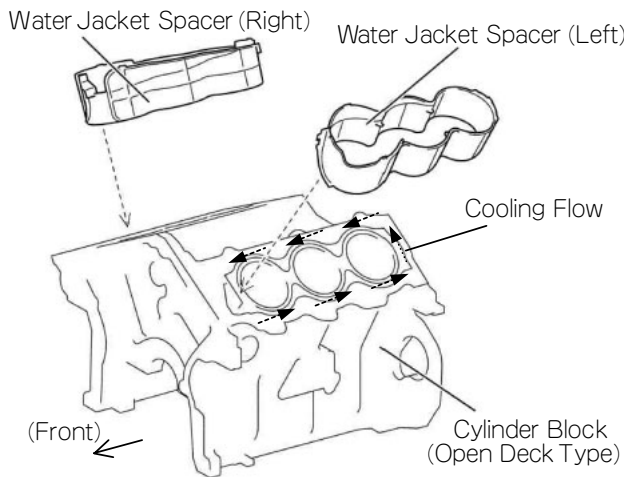


図2 Cylinder Block and Water Jacket Spacers

部程狭くするという方法は、特に近年主流のアルミダイカストのブロックでは、要求されるW/Jの金型厚さや形状の複雑さから、金型自体の耐久性の大幅低下につながる。このような設計・製造上の制約を克服する手段として、ブロックとは別体のスペーサをW/J内に配置する技術を考案してきた。

3. 基本設計

3.1 スペーサの形状

表1に最初に適用したエンジンの諸元を示す。図2にはシリンダブロックとスペーサの外観を示す。エンジンはオープンデッキ構造のV型エン

ジンである。シリンダブロックへの冷却水の流し方はブロックUターン方式であり、ブロックのW/J内に導入された冷却水は、直ぐにシリンダヘッドに上がる流れと、外周側から内周側を周ってフロント側に戻る流れに分かれる。スペーサは、このエンジンに合わせて図のような円筒を連ねた形状とし、左右バンクそれぞれに最適化した。

図3にスペーサを挿入したW/Jの一般断面の概略を示す。W/J上部は、冷却水を集中的に流すため通路面積を大きく確保した。W/Jの中央から下側は、冷却抑制のため冷却水の通路幅をスペーサによって狭くした。スペーサとW/J壁と

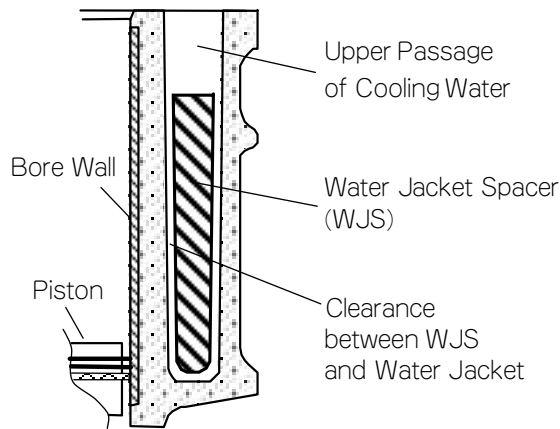


図3 Cross Section of Water Jacket with Water Jacket Spacer

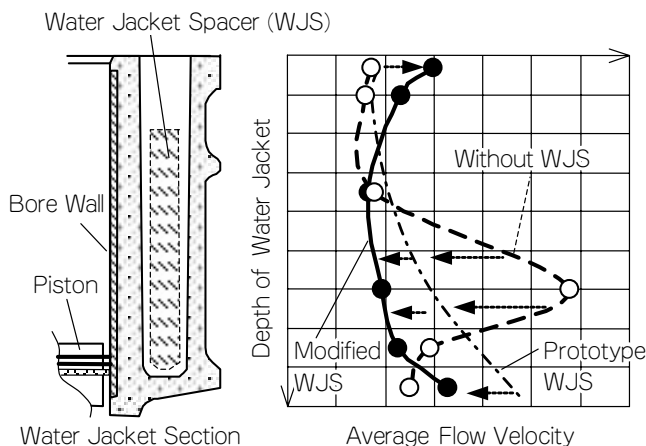


図4 Flow Velocity Distribution by CFD

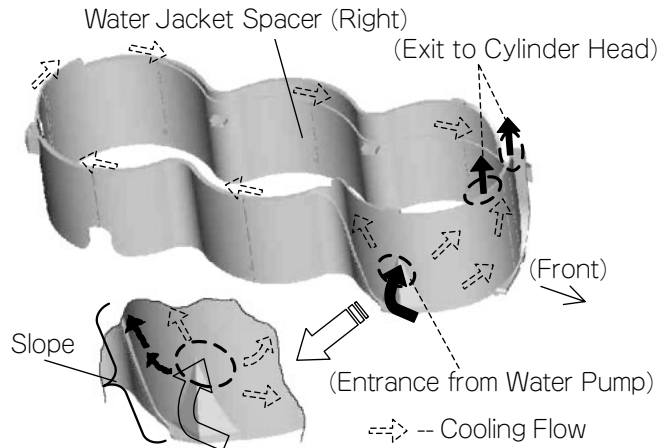


図5 Water Flow Improvement through CFD

の隙間は、スペーサの組み付け性とボア下側の冷却性を考慮して最適化した。

スペーサ形状の最適化には、CFDによる流れ解析を活用した。図4に解析事例として、右バンク外周側W/Jの断面流速分布を示す。スペーサを入れていない場合の流速（破線）は、ボアの中央からやや下側で最大となっていた。この理由は、V型エンジンでW/J自体がバンク角度分傾斜していることで、冷却水が水平に導入されてはいてもボア壁に対して相対的に下向きになったためである。この下向きの流れはかなり強かったため、開発初期のスペーサ（一点鎖線）形状では下側の流速が逆に大きくなった。そこでこの流れをW/Jの上部にうまく集中させる為、スペーサの水入口近傍部に、スロープ形状の突起を設定した（図5）。このような流れ解析と形状見直しを実施した結果、最終形状におけるスペーサ（図4，実線）では、中央部付近で突出していた流速を大幅に下げ、上部の流速を上げる事ができた。

3.2 材質

材質は重量増加抑制とコストの観点から樹脂とし、形状自由度と量産性の観点から金型射出成形とした。樹脂材は、組み付けや使用時の必要最小強度の確保、ブロック内での使用環境か

ら、耐熱性、耐水性、耐LLC性、耐摩耗性を考慮し、ガラス繊維強化の芳香族系ポリアミドを選定した。

4. ボア壁温分布の改善と燃費低減効果

4.1 ボア壁温測定方法

スペーサの効果と背反の確認の為、表1のエンジン単体の台上試験により、ボア壁温と燃料消費率の測定を行った。試験は回転数とトルクを合せた定常運転条件で実施した。燃料消費率の測定条件は、10 - 15モード中の使用運転条件を頻度解析して、寄与の大きい部分負荷域数点（以下モード代表点）の定常条件で評価した。壁温測定は、燃料消費率測定の場合のほかに、最高温度の確認のため、最高出力点を含む全負荷域で数点実施した。

ボア壁温の測定は、詳細な温度分布を確認するため、各気筒それぞれ摺動方向に4段、周方向に4方向の計16箇所、6気筒合計96箇所で行った。測定用熱電対は、ボア壁表面より1mmの位置を測温する為、シリンダライナに埋め込んだ。熱電対の埋め込み用穴は、スペーサの脱着が可能なように、ブロックの上面から垂直に開けた。熱電対はΦ0.5mmのシー型熱電対を使用し、穴への固定は測定に与える影響を小さくするた

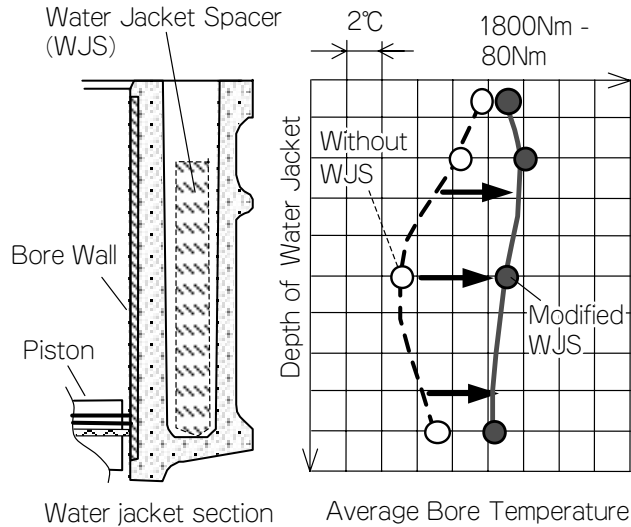


図6 Improvement of Temperature distribution

め、金属粉を含有する高熱伝導性の耐熱接着剤を使用した。

4.2 ボア壁温分布の改善

図6にスペーサが無い場合と入れた場合のボア壁温分布を示す。スペーサにより達成した温度分布改善効果の大きさは、気筒間や同一気筒内においても、方向等で差異が認められた。ここでは全体的な傾向を把握しやすくする為、全6気筒分のデータを高さ毎に平均化した値で示した。スペーサが無い場合、ボアの中央部の温度がやはり低くなっている。これに比較してスペーサを入れた場合、ボア上部の温度上昇は2℃以下に留まっているのに対して、中央部では6℃前後、下部でも3℃以上の温度上昇の達成が確認できた。当初の狙いであるボア上部の壁温低減までは達成できなかったが、上から下までほぼ均一な壁温分布へと改善している事を確認できた。

全負荷域での壁温測定では、全気筒中の最も高い部位において温度上昇の無いことも確認できた。

4.3 燃費低減率

スペーサによる燃料消費量の低減効果は、各モード代表点の実測値に別試験で求めた寄与率を乗じて算出した。今回の試験では、約0.7%の効果が得られた。

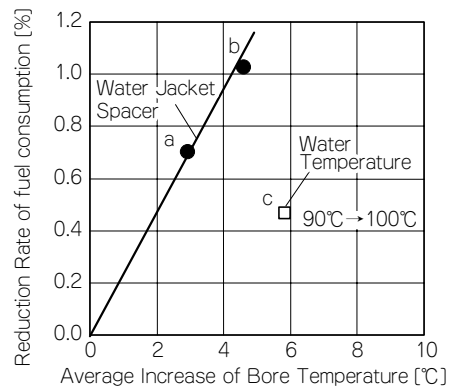


図7 Effect of fuel consumption decrease (10-15mode Estimated Efficacy)

5. 壁温の上昇と燃費向上効果の考察

スペーサによる燃費効果の妥当性を見るため、ボア壁温の上昇度と燃費低減率の関係を確認した。図7にスペーサ形状を若干変更した時の結果(a, b)を、スペーサ無しで水温だけを上げた高水温化試験の結果とともに示す。この図の壁温上昇は、スペーサ無しの試験を基準にスペーサを入れた時の温度上昇を全測定点で平均した値で示した。高水温化試験の結果は、エンジンの入口水温を上げ、出口水温を90℃から100℃にした時の効

果である。

図から、スパーサを入れた場合は、ボア壁温上昇と燃費低減効果がほぼ比例する事が確認できた。更に壁温上昇に対する燃費低減効果を比較すると、スパーサを用いた時の方が単純に水温を上げた場合より大きい事も確認できた。この理由は、以下と考えている。

- ① 今回の試験では単純に高水温化したため、ノッキング悪化の影響が大きく出た（高水温時には最適なエンジンの設計・制御が必要）。
- ② 高水温化したことにより、ピストン系や動弁系等で境界混合潤滑領域の範囲や比率が増加した。一方、ブロックのボア壁温の改善のみを目的としたスパーサの場合は、これらのデメリットをより小さくできたと考えている。

6. まとめ

ボア壁温の分布を改善できる、W/Jと別体のウォータージャケットスパーサを開発してきた。

- ・ W/J内の冷却過剰な部位にスパーサを設置し、ボア上部に冷却水を集中して流している。
- ・ この結果、主に中央から下部側のボア壁温を向上させることで温度分布の均一化と、燃費の改善を達成している。

7. おわりに

スパーサの製品化に対しての多大なご協力はもとより、その可能性の探索を継続して頂いて

いる愛三工業株式会社、ニチアス株式会社、内山工業株式会社、デュボン株式会社殿に感謝いたします。

参考文献

- 1) 河西純一：自動車技術, Vol.58, No.8 (2003) p.15
- 2) 土井治朗 他：自動車技術, Vol.55, No.8 (2001) p.6
- 3) Wakuri Y. et al. : SAE 952471
- 4) Nakada, M. : Proceedings of the International Tribology Conference, Yokohama 1995
- 5) 小杉尚 他：月刊トライボロジー, 2003. 10 p.40
- 6) 萩原秀実：月刊トライボロジー, 2003. 5 p.12
- 7) G. Barbezat : Proceedings of the International Tribology Conference, Nagasaki 2000
- 8) 山田功二 他：自動車技術, Vol.54 (2000)
- 9) 藤田貴也 他：自動車技術会学術講演会前刷集 9433687
- 10) 本田技研工業：広報資料
- 11) トヨタ自動車：新型車解説書
- 12) 伊藤泰志 他：第6回内燃機関合同シンポジウム講演会論文集, '87-1-22, 東京 p.373
- 13) 関貴光 他：自動車技術会学術講演会前刷集 9933916
- 14) 北原辰巳 他：第14回内燃機関合同シンポジウム講演会論文集, '97-9-3, 名古屋 p.391
- 15) 瀧口雅章 他：自動車技術会学術講演会前刷集 871003
- 16) 瀧口雅章 他：自動車技術, Vol.54, No.5 (2000) p.76

筆者紹介



中田高義

トヨタ自動車株式会社
パワートレーン開発本部
エンジン統括部