

シリンダボア変形を考慮した ピストン挙動シミュレーションによるフリクション解析

Friction Analysis by Piston Secondary Motion Simulation
in Consideration of Cylinder Block Bore Distortion

佐藤 謙 次*

Kenji SATO

伊 東 真**

Makoto ITO

藤 井 欽 也*

Kinya FUJII

香 田 信 介*

Shinsuke KODA

要 旨

ピストンスカートのフリクションは、シリンダブロックのボア変形やピストンの挙動と従来関係があるといわれており、検証がなされていたが、単独の評価がほとんどであり、実機での仕様変更における詳細な相関性が明確になっていなかった。そこで、本研究では、コンピュータシミュレーションを用い、シリンダブロックのボア変形とピストン挙動を求め、これらを組合せることで実機との相関性向上を試みた。最初に、計算結果を計測値と比較し、その妥当性を確認した。その後、実際のエンジン開発に適用し、フリクション予測手法を構築するとともにエンジン性能の向上を検討した。また、予測はフリクションのみではなく、信頼性についてもおこなった。その結果、信頼性の向上、および、約2%のエンジンフリクション低減が実現された。

ABSTRACT

Piston skirt friction has been considered to be related to cylinder block bore distortion and piston secondary motion, but it has been studied almost exclusively in isolation, and its detailed relationship to the functioning of an actual engine has not been clarified. We used computer simulations to reproduce cylinder block bore distortion and piston secondary motion in combination to try to increase our understanding of their relationship with an actual engine. First, calculated results were compared with measured values to ascertain their validity. Next, the technique was applied to the development of an actual engine, and the engine performance was studied along with the establishment of a method to predict friction. The application of the new simulation technique in engine development resulted in increased reliability and a reduction in friction of approximately 2%, demonstrating the effectiveness of the method.

1. まえがき

エンジンの燃費を向上させる基本的な手段としてフリクションの低減が挙げられ、特にエンジンフリクションの約25%を占めるピストン廻りのフリクション⁽¹⁾低減が課題と考えられる。ピストンフリクションに相関のある要因として、シリンダブロックのボア変形と、ピストンそのものの挙動によるライナとのしゅう動がある。これらは、最近時コンピュータシミュレーションによる解析事例の報告⁽²⁾⁻⁽⁴⁾もあり、エンジン開発にも適用されつつある。そこで、これらのシミュレーションの精度を再度確認するとともに、組み合わせることで予測精度の向上を図った。実際に本予測技術はエンジン開発に適用され、そこから得られた結果についても報告する。

* 栃木研究所

**山王テック株式会社

2. 研究のねらい

シリンダブロックのボア変形およびピストン挙動の検証は従来おこなわれているが、それぞれ単独での評価がほとんどであり、仕様変更における詳細な実機性能との相関性が明確になっていなかった。また、ピストンはエンジン開発の中でさまざまな性能が要求され、総合的な判断が可能な手段を求められていた。

そこで、コンピュータシミュレーションを用いシリンダブロックボア変形とピストン挙動の双方を組み合わせ、ピストンスカート廻りの形状を変化させた場合のフリクション低減量、かじりの信頼性が精度良く判断できる予測技術の構築を試みた。

3. 計算手法

3.1. 計算の流れ

計算の流れを Fig. 1 に示す。シリンダブロックの変形・熱分布の構造計算には ABAQUS を、熱分布計算の精度を向上させるためのウォータージャケット内の熱伝達係数分布の流体計算⁽⁵⁾には STAR-CD を使用している。また、ピストンの3次元挙動計算には PISDYN を使用している。

3.2. シリンダブロックボア変形計算

Fig. 2 にシリンダブロックの熱分布・変形計算に用いる FEM モデルを示す。熱分布計算と変形計算は独立におこなわれ、変形計算の次の行程に熱分布計算の結果を参照させ

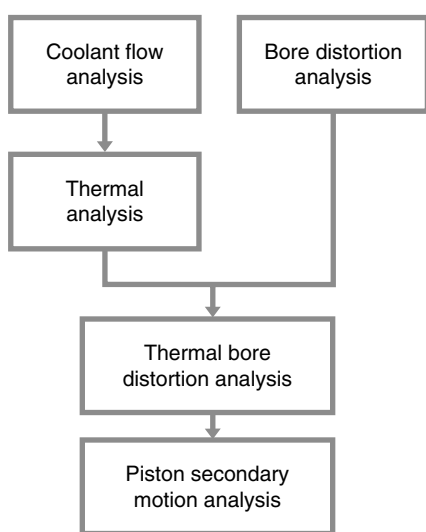


Fig. 1 Calculation flow

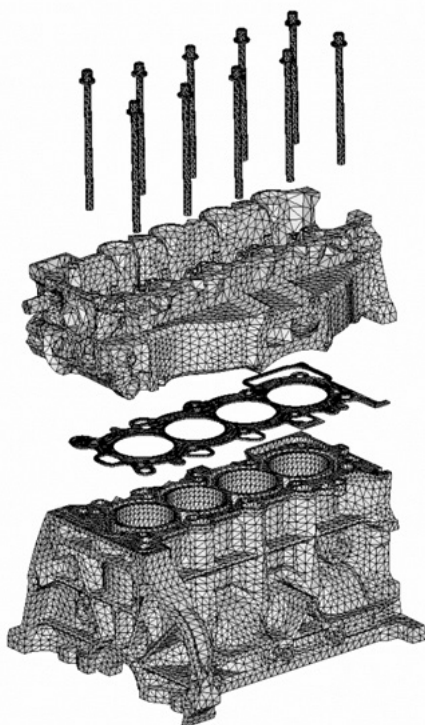


Fig. 2 Cylinder block FEM model

ることで、熱間時の変形を再現している。

熱分布計算の主な入力条件としては、各部材の熱伝導率、部材表面の熱伝達率、雰囲気温度が挙げられる。クーラントによる熱伝達率は前述のように、流体計算による熱伝達係数を構造モデルに受け渡すことで定義されている。Fig. 3 に流体計算による熱伝達係数の分布を示す。ライナ部を含むその他の部位については、計測値もしくは経験による条件設定が必要であり、現時点では実測の温度と比較をし、入力条件を修正するのが望ましい。

変形計算の主な入力条件としては、各部材のヤング率、熱膨張率、締結軸力、シリンダヘッドガスケットのばね特性が挙げられる。ヤング率、熱膨張率については温度依存性のデータを使用し、シリンダヘッドガスケットの非線形なばね特性については、単体計測試験結果を用いる。Fig. 4 にその特性を示す。

Fig. 5 にシリンダブロックの熱間時変形コンタ図を示す。

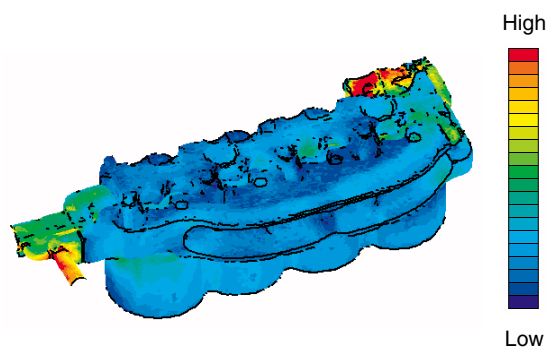


Fig. 3 Distribution of heat transfer coefficient

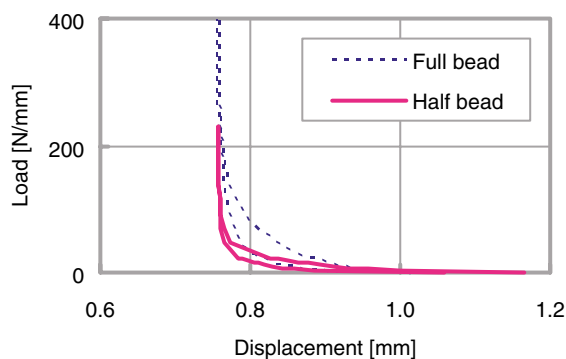


Fig. 4 Gasket characteristic

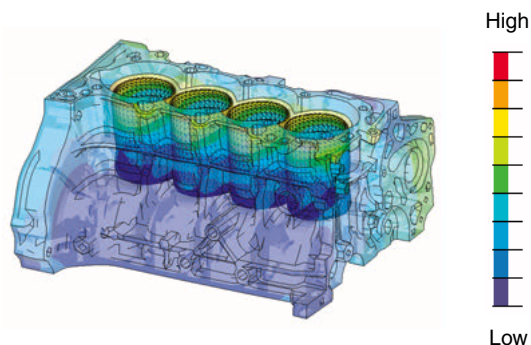


Fig. 5 Cylinder block bore distortion

3.3. 3次元ピストン挙動計算

Fig. 6 にピストンの FEM モデルを示す。ピストン挙動計算はプログラム上、半気筒でおこなわれFEMとしては、ピストンとシリンダブロックを準備し、縮退したデータを用いる。ピストンについては、温度計算を実施し、温度分布による熱膨張を考慮したモデルとしている。

シリンダブロックボア変形の計算結果は、数値データとして入力される。ピストンスカートとライナのしゅう動面には弾性流体力学(Elasto Hydro Dynamics: EHD)を考慮した油膜特性が適用され、また、表面粗さによる境界潤滑状態も考慮するため、表面粗さ R_q を測定し入力している。

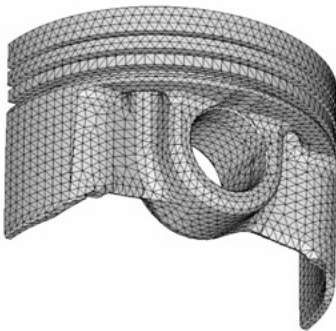


Fig. 6 Piston FEM model

4. 計算結果と計測結果

4.1. シリンダブロックボア変形

実機性能試験への適用の前に、変形計算結果の妥当性についての検証を実施した。

Fig. 7 に常温締結状態でのシリンダブロックボア変形を、Fig. 8 に高温槽での均一加熱状態でのシリンダブロックボア変形をそれぞれ IN-EX 方向での直径変化量で示す。なお均一加熱状態での比較は、常温締結での誤差をキャンセルす

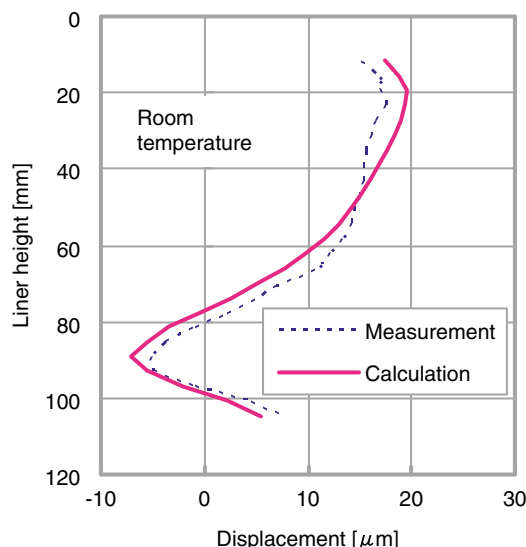


Fig. 7 Bore distortion at room temperature

るため、温度変化分での変形量で示している。計測はインコメータを使用し、L型4気筒エンジンの3番ボアを代表として比較した。それぞれ計算と計測はよい相関性を示している。

Fig. 9 に温度分布の測定箇所を、Fig. 10 に計算と計測の比較を示す。ライナ高さに対しデッキ面より9mmと89mmの2断面で温度の比較を実施した。計測には熱電対を使用し、計算と実測の温度差が10℃以内に収まるように入力条件を調整してある。

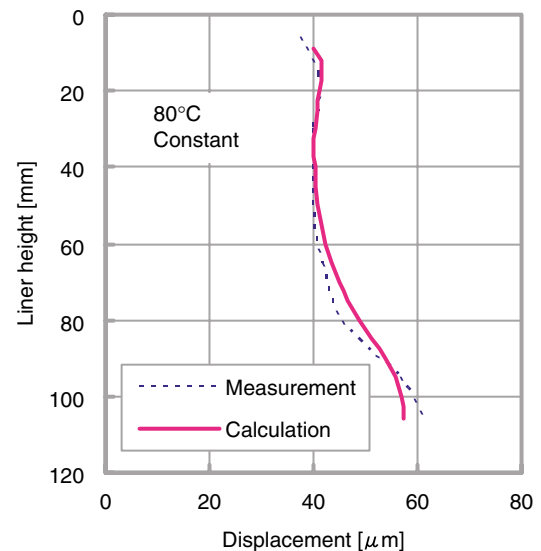


Fig. 8 Bore distortion for temperature difference

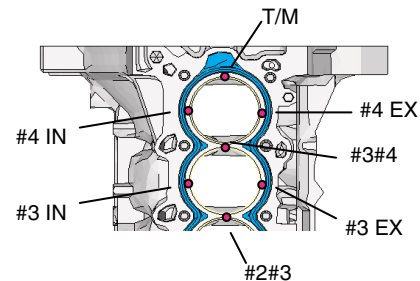


Fig. 9 Temperature measurement point

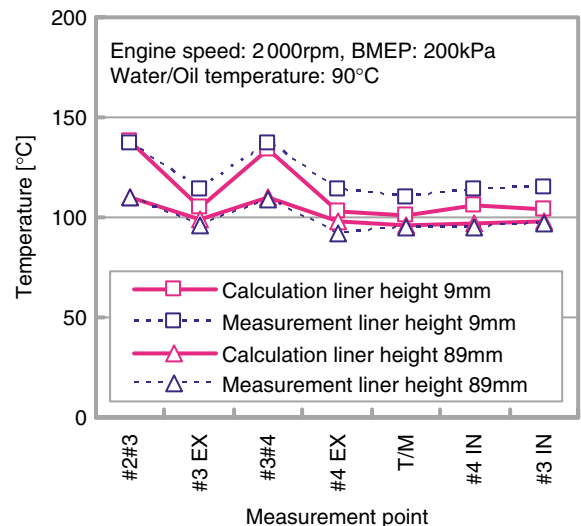


Fig. 10 Temperature distribution of cylinder block

4.2. ピストン挙動

シリンダブロックボア変形と同様に、ピストン挙動計算の妥当性を確認するために、実測との比較を実施した。

Fig. 11にピストン挙動の並進移動量の計算と計測の比較を Fig. 12 に回転移動量の計算と計測の比較を示す。計測はシリンダブロックにギャップセンサを埋め込みおこなった。センサ配置の都合から、挙動の測定は TDC 前後の約 60 度の間のみおこなわれている。

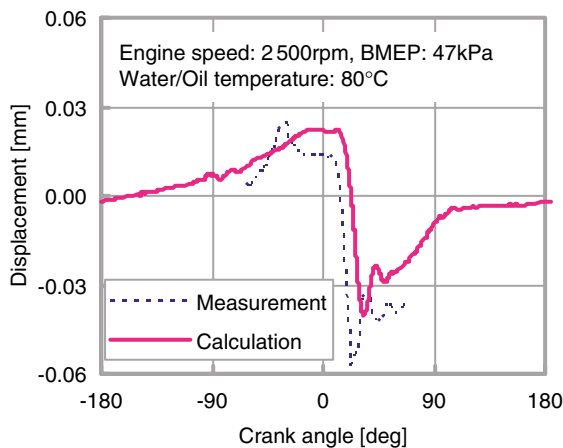


Fig. 11 Translation movement

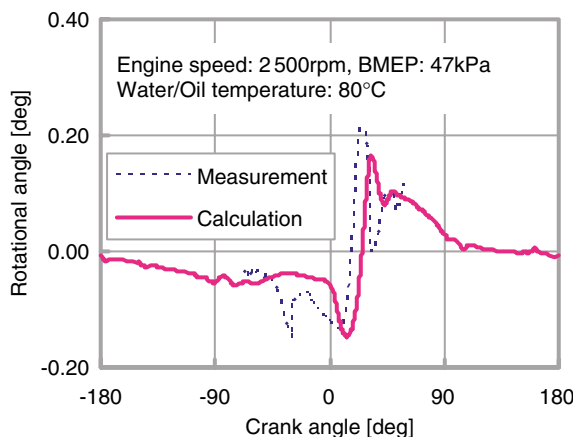


Fig. 12 Rotational movement

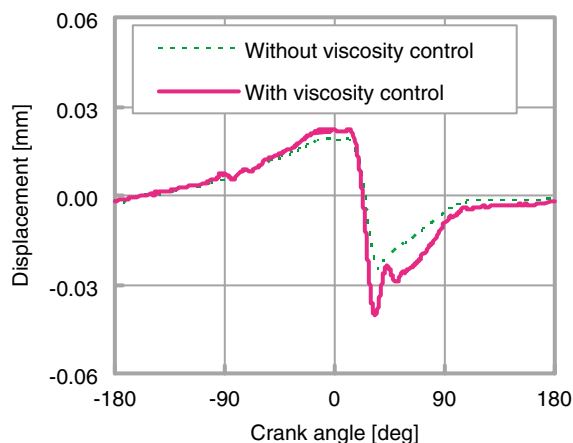


Fig. 13 Comparison of oil viscosity in piston secondary motion

Table1 Specifications of engine and piston

	Previous engine	Newly developed engine
Cylinder configuration	Inline 4-cylinder	Inline 4-cylinder
Engine type	SOHC 2 Valves	SOHC 2 Valves
Ignition system	Dual point sequential ignition	Dual point sequential ignition
Fuel supply system	PGM-FI	PGM-FI
Displacement [cm ³]	1339	1339
Bore x stroke [mm]	73 x 80	73 x 80
Compression ratio	10.8	10.8
Maximum power [kW]	63	70
Maximum torque [Nm]	119	123
Compression height [mm]	26.2	26.2
Skirt width x height [mm]	34 x 29.5	38 x 29.5
Piston weight [g]	207	205
Piston shape		

プログラム上、ピストンスカートとライナの間にはオイルが隙間無く充填されている状態となり、過ダンピングの傾向を示す。よって今回は計算上のオイル粘度を調整することにより、挙動を実測に近い状態としている。オイル粘度調整前後の並進移動量の計算結果を Fig. 13 に示す。

5. 実機適用結果

5.1. 実機エンジンとピストンの基本緒元

前述のように計算精度の妥当性が得られたので、ピストン仕様変更による実機のフリクション、信頼性向上の効果予測をおこない、試験結果との比較をした。

Table 1に従来仕様と新たに開発された仕様のエンジンおよびピストンの諸元を示す。ピストンの仕様変更は2回おこなった。1回目では、ピストン形状、材料⁽⁶⁾の変更をおこない、2回目では、ピストンフォームのみを変更した。

Fig. 14 にピストンスカート部の剛性分布を示す。また、Fig. 15にピストンスカート部剛性のピストンピン中心断面での勾配比較を示す。剛性はスカート部 FEM の各格子点に単位荷重を与え変位量を求め、バネ値を算出している。開発仕様は不均一な当りを避けるため、より柔らかく、かつ均一な剛性分布をねらって設計した。

ピストンフォームの楕円変化量は、まずピストンスカート端部の強い当りを回避することを目的に楕円量を大きくとった。次にピストンスカート中央の楕円突部の流体潤滑フリクションを低減しつつ、境界潤滑フリクションが増加

しないように調整をした。

なお、今回の検討範囲では縦変化量は楕円量に比べ、フリクションへの寄与度は低かった。

5.2. フリクション検討結果

暖機後モータリング運転条件でのフリクション低減率の計算と実測の比較を Table 2 に示す。形状・材料の変更で、1.3%の低減効果が得られ、ピストンフォームの変更にて0.7%の低減効果が得られた。従来仕様に比較し、エンジン単体フリクションで合計 2.0%の低減効果が得られ、その割合は、計算と計測でよい相関性を得ることができた。

Fig. 16に、1回目の仕様検討におけるピストンスカート円周方向での境界潤滑時の圧力分布を示す。圧力は各円周

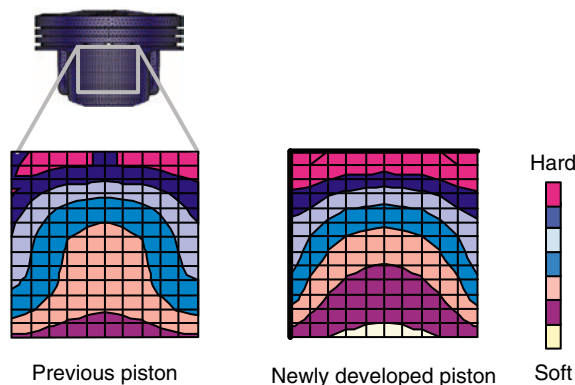


Fig. 14 Piston skirt stiffness

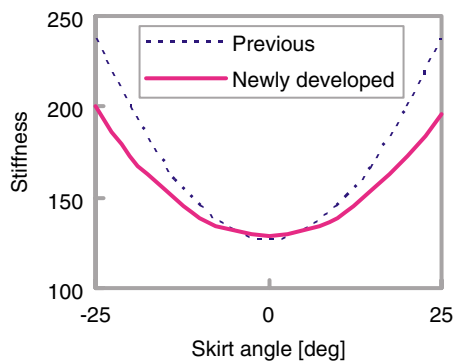


Fig. 15 Piston skirt stiffness in piston pin center section

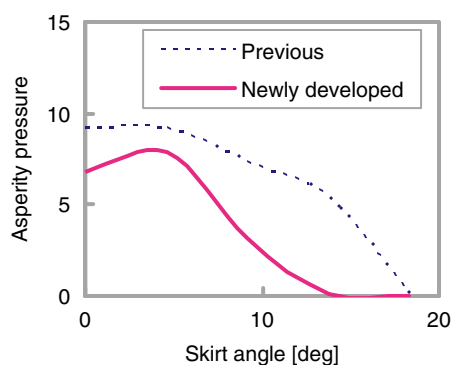


Fig. 16 Asperity pressure

Table 2 Friction reduction rates

	Calculation	Measurement
Piston shape & material	-1.4%	-1.3%
Piston form	-0.7%	-0.7%

方向断面での積分値である。前述のように開発仕様のピストン剛性はピストンスカート円周方向端部での剛性値が低いため、境界潤滑時圧力の円周方向端部に向かっての低下が大きい。スカート円周方向端部での剛性増加が少ない、より均一な剛性分布のピストンの方がフリクションの増加が少ないことがわかる。

また、Fig. 17に、1回目の仕様検討における形状・材料（ヤング率、熱膨張係数）のフリクションへの寄与度を示す。計算上で材料物性値を変更して検証した。今回の仕様変更による寄与度は、形状が74%、ヤング率が22%、熱伝導率が4%であった。

Fig. 18に2回目の仕様変更におけるシミュレーションでのシリンダブロックボア変形量の寄与度を示す。シリンダブロックボア変形量を入力することによりフリクション予測精度が向上しているのがわかる。

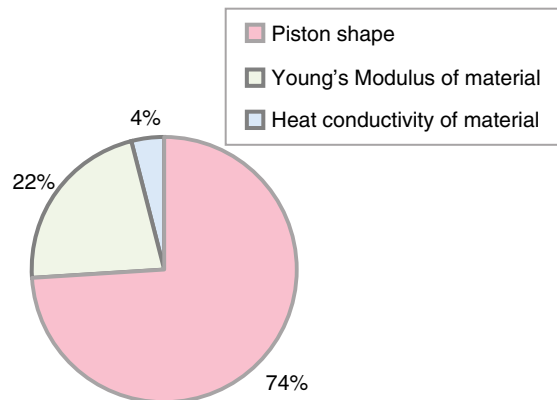


Fig. 17 Influence of piston shape and material

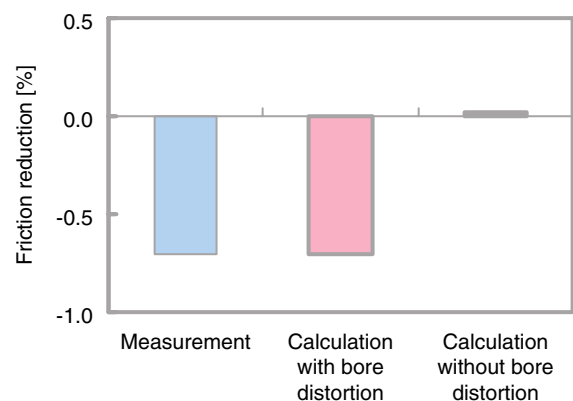


Fig. 18 Influence of bore distortion in friction prediction

5.3. かじり検討結果

信頼性の評価は、かじりの項目で実施している。評価指標にはWear Load(境界潤滑による接触の単位面積当りの仕事率、面圧×速度)を用いる。

Fig. 19 に比較結果を示す。検討は、シリンダブロックの温度を変化させた状態でのシリンダブロックボア変形量の傾向から、変形量の上下限を考慮している。図中の誤差

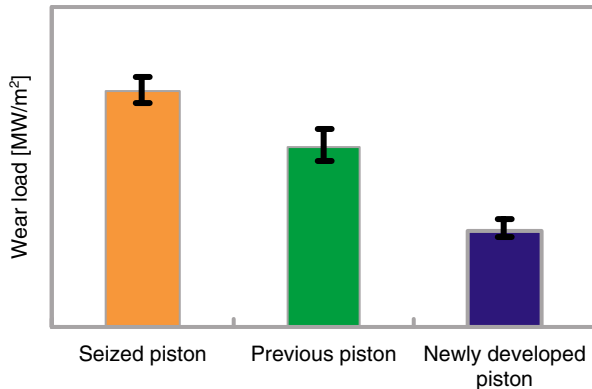


Fig. 19 Comparison of wear load

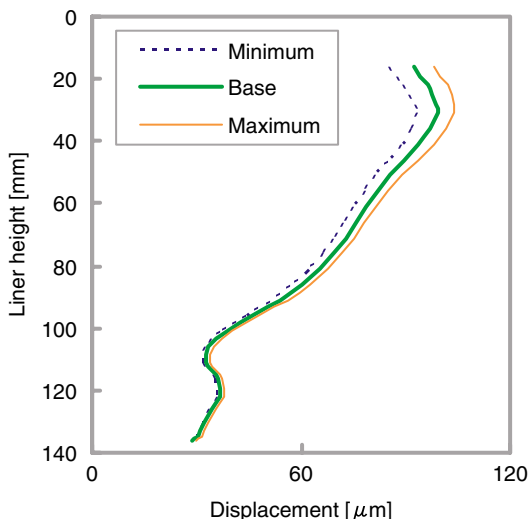


Fig. 20 Bore distortion by temperature difference

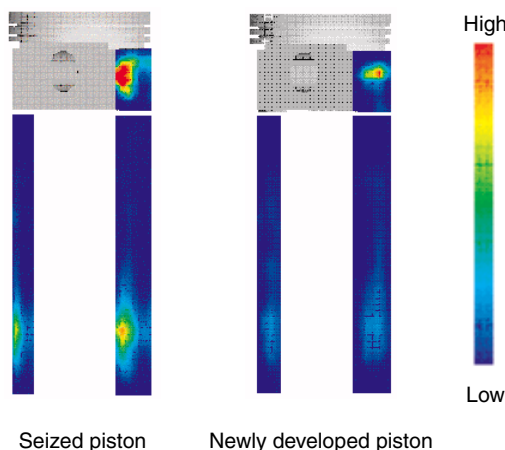


Fig. 21 Distribution of wear load

表示はシリンダボア変形量の上下限での Wear Load である。Fig. 20 にシリンダブロックボア変形の温度による影響を示す。

従来仕様のピーク値は実機試験でかじりを起こした仕様に比べ低く、開発仕様はさらに低い値となっている。

Fig. 21 にピストンスカート部の Wear Load の分布状態の比較を示す。Wear Load の分布が狭くなっていることがわかる。これは、フリクションと同様に、スカート端部の剛性が低いこととピストンフォームの楕円量を大きくしたことで、ピストンスカート端部の強い当たりが回避できているためである。

今回の仕様にて実機試験をかじりの発生なく終了することができた。

6. まとめ

- (1) 耐久信頼性の傾向を判断しつつ、フリクション低減の詳細な机上検討が可能となった。
- (2) 実際のエンジン開発に適用し、フリクション低減-2%の効果を得られた。
- (3) ピストンスカートの剛性は端部での増加の少ない、より均一な剛性がフリクション低減に効果がある。
- (4) 開発仕様のピストンのフリクション低減への寄与度は、形状が74%、ヤング率が22%、熱伝導率が4%であった。
- (5) ピストンフォームによるフリクション低減効果は0.7%あり、ピストンフォームによる改善も可能である。
- (6) かじりについては、Wear Loadによる評価が可能である。
- (7) フリクション、かじりの双方の評価において、シリンダブロックボア変形の入力が必要であり、その精度により評価結果が変化することがわかった。

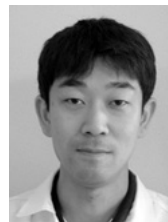
参考文献

- (1) 自動車技術会：自動車技術ハンドブック、＜第3分冊＞試験・評価編、p.38(1991)
- (2) Maassen, F., et al.: Analytical and Empirical Methods for Optimization of Cylinder Liner Bore Distortion, SAE Technical Paper, 2001-01-0569(2001)
- (3) Tomanik, E., et al.: Reduced Friction Power Cell Components, SAE Technical Paper, 2000-01-3321(2000)
- (4) Hoffman, R., et al.: Robust Piston Design and Optimization Using Piston Secondary Motion Analysis, SAE Technical Paper, 2003-01-0148(2003)
- (5) Xin, J., Shih, S., Itano, E., Maeda, Y., Kawamoto, M., Yamamoto, Y.: Theoretical Consideration to Improve Engine Cooling and Application of Coupling 3D Combustion Simulations with Heat Transfer in Water

Jacket and Components, Honda R&D Technical Review,
Vol.15, No.2, p.117 - 126

- (6) 谷畑昭人, 佐藤謙次, 古川和也: 高強度ダイカストピ
ストン材の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.17,
No.2, p.122 - 128

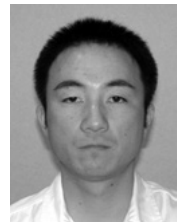
■ 著 者 ■



佐藤 謙次



藤井 欽也



伊東 真



香田 信介