

3次元クロスハッチによるシリンダライナのフリクション低減とメカニズム解明

The friction reduction effect and mechanism elucidation of the liner inner surface properties with local wide and deep grooves

TPR (正) *大平 昌幸 (非) 谷本 正剛 TPR工業 (非) 大泉 貴志

Masayuki Ohira*, Seigo Tanimoto*, Takashi Oizumi**

*TPR CO., LTD., **TPR INDUSTRY CO., LTD.

1.はじめに

日本国内のCO₂排出量の約2割を運輸部門が占め、そのうち約3割を占めているのが貨物自動車である。つまり貨物自動車のエネルギー効率を改善することがCO₂の削減に繋がり、このエネルギー効率改善の一つに機械損失低減が挙げられる。

これまで自動車用ディーゼルエンジンにおいて、シリンダライナ内周面のピストンリングの行程中央に当たる部分に、Figure.1に示すような3次元クロスハッチ（従来のホーニングによる粗さより幅が広く、深さが深い溝、各図中内にて3D C/H表記）を設けることで、オイル消費の増加を抑え、モータリング試験にて機械損失の一つであるシリンダシステムのFMEPを約20%低減できたことを報告した¹⁾。

本報告では、エンジン緒元やオイルおよびピストンリングの各仕様に合わせ、FMEPが最小となる3次元クロスハッチを設計する取り組みとして、CAE解析により3次元クロスハッチの効果を再現する方法を設定し、フリクション低減メカニズムの解明した。

2.評価方法

CAE解析ソフトウェアとしてAVL製Excite Piston & Rings（以降EPR）^{2), 3)}を使用してフリクション解析を行った。解析条件は浮動ライナを用いたヘッド大気開放のモータリング試験を模擬した。解析条件とした浮動ライナ評価条件並びに供試ピストンリング仕様をTable 1に示す。

評価対象であるシリンダライナ内周面性状は、Rvkを0.3程度の量産相当品を基準（各図中内にてSTD表記）とした。3次元クロスハッチは行程中央部（クランク角度50°から140°のオイルリング位置）に設け、行程中央部以外の粗さ、即ち下地粗さは、STD同様にRvkを0.3程度とした。

3次元クロスハッチの大きさはモチーフ深さW=0.5と0.9の2緒元とした。

フリクション解析に使用したシリンダライナ内周面性状およびピストンリング外周面粗さの測定は白色干渉計顕微鏡を用いた。

測定したデータをEPR関連ツールのMicroslideに入力し、フリクション解析用のデータとして混合潤滑における接触剛性特性、レイノルズ方程式の流れテンソルおよび流体接触によるせん断テンソルといったピストンリング外周面と各シリンダライナ内周面間の接触に係るパラメータを求めた。

3.評価結果

3.1 Microslideを用いたライナ内周面性状数値化

Microslideを用いた解析結果の一つであるシリンダライナ行程中央部の粗さパラメータRqと白色干渉計顕微鏡での測定結果の比較をFig.2に示す。

STDに対しマクロな面性状を持つ3次元クロスハッチは、ピストンリング1本分の外周面幅を解析範囲とする方法(Single ring)では解析結果と測定結果に乖離が認められるが、ピストンリング外周面性状を複数連結させ解析範囲を広げた方法(Multiple rings)では解析結果と測定結果が同水準となり、シリンダライナ内周面性状を数値化出来ていることがわかる。

以降の解析はMultiple ringsで得られたフリクション解析用データを使用し実施した。

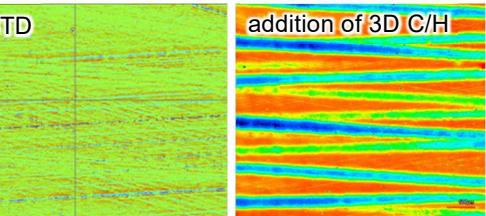


Fig.1 Contour chart of liner inner surface
(left: STD, right: addition of 3D C/H)

Table 1 Friction test condition and piston ring specification

Oil : 10W-30(@80°C)
Bore×Stroke : 83×86mm
Speed : 600~2000r/min motoring
TOP Ft=6N
2ND Ft=5N
2piece oil ring Ft=14N land width 0.1

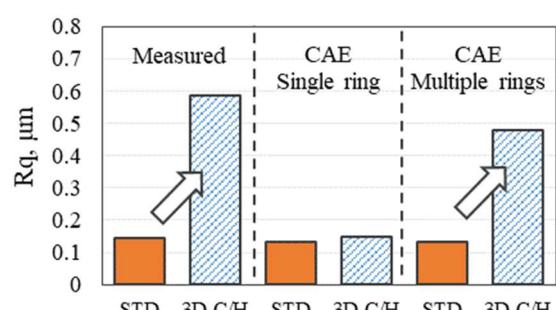


Fig.2 Liner inner surface roughness

3.2 フリクション解析および浮動ライナフリクション試験結果との同定

浮動ライナにて測定したフリクション波形と EPR にて解析したフリクション波形を Fig.3 に示す。また、フリクション波形から算出した各面性状における FMEP の計測結果と解析結果を Fig.4 に示す。FMEP 値は STD を 1 とした比率で示す。

フリクション波形の解析結果は、測定結果と同様に行程中央の 3 次元クロスハッチを設けている範囲の摩擦力が低く、FMEP の STD に対する低減割合も 28.3% となり、計測結果に近い傾向を示した。

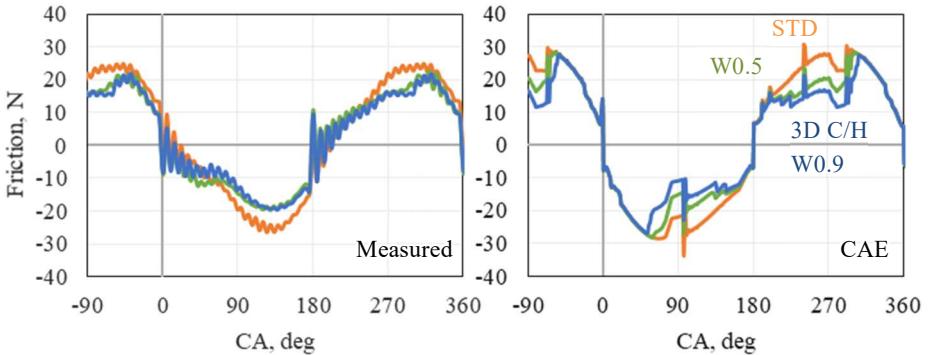


Fig.3 Total friction of each liner surface (left: Measured, right: CAE)

Fig.4 FMEP of each surface liner

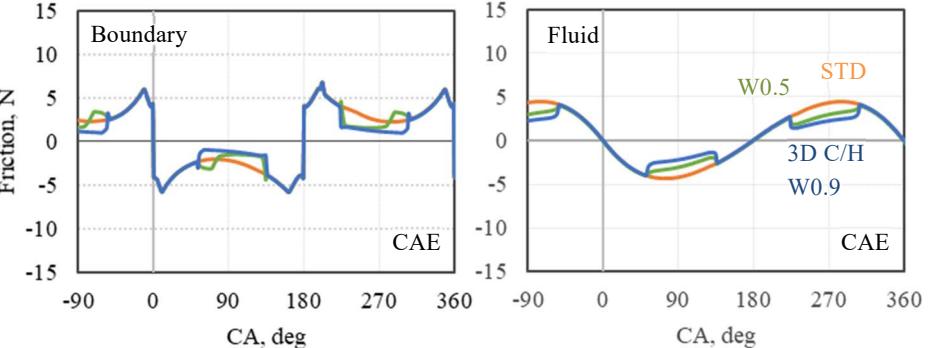
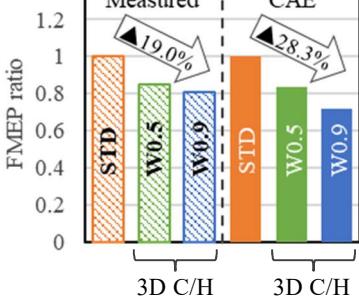


Fig.5 Boundary and fluid friction of oil control ring as CAE (left: Boundary, right: Fluid)

3.3 3次元クロスハッチによるフリクション低減メカニズム

Fig.5 にオイルリングの境界潤滑と流体潤滑のそれぞれのフリクション解析結果を示す。また、Fig.6 にオイルリング摺動部の油膜厚さの解析結果を示す。

Fig.5 と Fig.6 の解析結果より、3次元クロスハッチを設けた範囲では STD に対し油膜は厚くなり、流体潤滑における油膜のせん断抵抗が低減し、流体潤滑割合が拡大され、フリクションが低下したことが解った。

ここでの油膜厚さ増加の要因は、Fig.7 に示すようにシリンダライナ内周面に深い溝がある 3 次元クロスハッチの方が平均化した油膜厚さ (h) が厚くなるためであることがわかる。一般的にシリンダライナ内周の粗さである R_k や R_{vk} を大きくすることで W を大きくし、同様の効果を得ることは期待できるが、過大な R_{vk} はフリクション悪化および LOC 増加を招く。3次元クロスハッチは R_{vk} と W を別々に制御し、フリクション低減と LOC 増加抑制が両立出来る部分に特徴を持つ。

4. まとめ

・シリンダライナ内周面性状を模擬したフリクション解析は、ピストンリング摺動幅複数本分を解析範囲とすることにより、行程中央の摩擦力を実測同様に評価することが出来る。

・3次元クロスハッチによるフリクション低減は摺動部の油膜厚さ増加による油膜のせん断力低減と流体潤滑割合拡大による効果である。

・今後、今回の解析モデルを使用し、エンジン緒元やオイル仕様およびピストンリング仕様に合せた最適なシリンダライナ内周面性状設定を行っていく。

5. 文献

- 1) 田牧, 清水, 大泉 : 3次元クロスハッチによる自動車エンジン用シリンダライナのフリクション低減, トライボロジー学会 2022 春予稿集
- 2) 山本, 落合 : ボア変形を有するシリンダとピストンリングの動的接触解析, 自動車技術会論文集 Vol.50 (2019)
- 3) EXCITE PISTON&RINGS Basic Training Ring Dynamics, AVL JAPAN (2018)

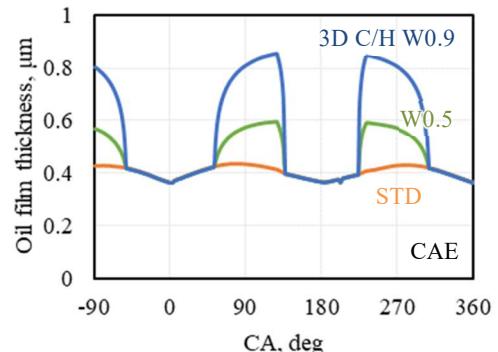


Fig.6 Oil film thickness which periphery of oil control ring as CAE

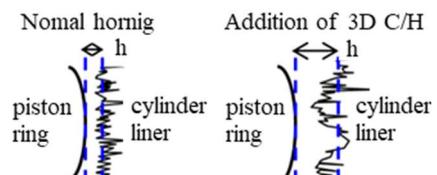


Fig.7 Image of Oil film thickness between piston ring and cylinder liner