

ピストンパターンコーティングを施した ピストンスカート表面における潤滑油の流動解析

Fluid simulation of lubricating oil on piston skirt surface with pattern-coating

大同大・工（学）*鈴木 智也 大同大・工（正）坪井 涼 いすゞ（正）坪田 頼昌

Tomoya Suzuki*, Ryo Tsuboi*, Yorimasa Tsubota**

*Daido University, **Isuzu Motors Limited

1. 緒言

HEV 化や電動化の進展により、自動車用内燃機関は一層の熱効率向上と機械損失低減が求められている。内燃機関の熱効率向上のためには各種エネルギー損失を低減することが有効であるが、本研究では摩擦損失低減に着目した。内燃機関の摩擦損失低減を目的とした方法の一つとして、ピストンスカート部へのパターンコーティングがあげられる。パターンコーティングに関する研究はいくつか行われており⁽¹⁾⁽²⁾、そのパターン形状も種々提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾。スカート部分におけるオイルの流れを考えた場合、ピストンの上昇行程においてスカート部両端や戻し孔はオイルが潤沢である。一方、スカート部中央は貧潤滑状態であり、パターンコーティングを用いることにより、スカート部両端や戻し孔のオイルをスカート部中央に供給することで、結果として、スカート部分における摩擦・摩耗低減に対して大きな効果が期待できる。

ピストン・シリンダ内のような薄厚部分におけるオイルの流動状態の可視化は、数値流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）を用いることが有効であると考えられる。本研究では、実際に使用されているピストン形状のスカート部にパターンコーティングを付与したモデルをシミュレーション対象とし、潤滑油の流動状態の 3 次元シミュレーションを行うことにより、パターンコーティングの形状がピストンスカート部における潤滑油の流れや摺動特性に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. シミュレーション方法

シミュレーションの概略を Fig. 1 に示す。シミュレーションは、実際のピストン・シリンダのオイルリング溝からピストンスカートの領域を対象とした。オイルリングは簡略化した形状を用い、オイルリング溝の底面に接触した状態を模擬している。また、ピストンは戻し穴を有し、戻し穴の下方にパターンコーティングの溝を付与した。パターンコーティングは幅 w を 3 mm、厚さ h を 20 μm とし、摺動方向に対する角度 θ を 30°, 45°, 60°に変更した 3 種類の比較を行った。シリンダとピストンスカートとの間の膜厚は 10 μm とした。

シミュレーションは商用ソフトウェアである Fluent 2020 R1（ANSYS Inc., US）を用いて実施した。流れ場は非圧縮性層流を仮定し、支配方程式は連続の式とナビエ・ストークス方程式を用いた。作動流体は 100 °C のオイルで、密度 ρ を 820 kg/m³、粘度 η を 8.40×10^{-3} Pa·s とし、キャビテーションは考慮していない。

境界条件については、シリンダ側に 6.0 m/s のすべり速度 V を与え、ピストン側は固定壁面とすることで摺動状態を模擬した。また、上部境界、下部境界、側面境界は固定圧力 P_0 で 0 Pa とした。

3. 結果と考察

Figure 2 は摺動面（シリンダー側）の圧力分布の結果であり、付与したパターンコーティングの溝の角度により圧力

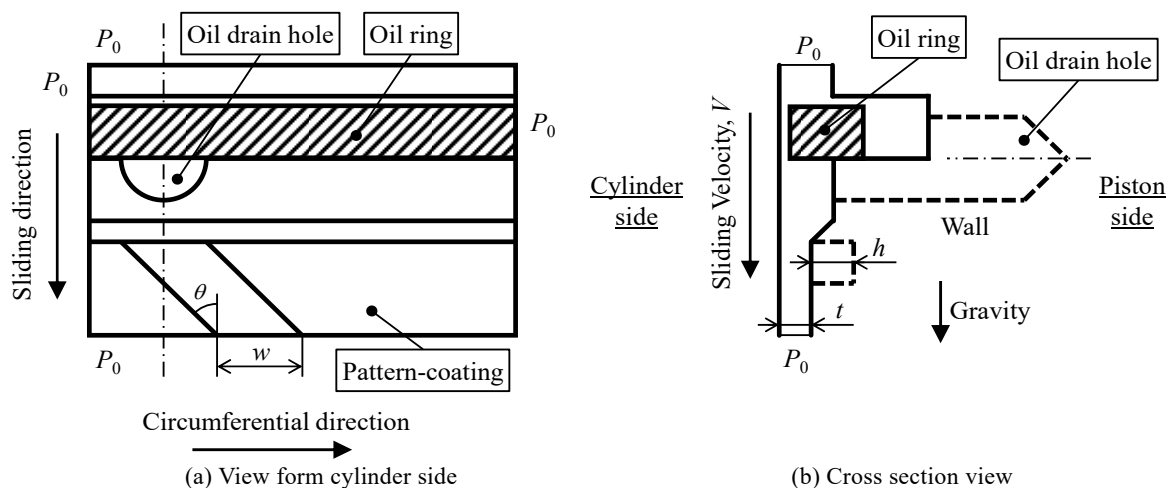


Fig. 1 Simulation overview and boundary condition

分布に変化を及ぼすことが確認できた。圧力分布の傾向は、ピストンの上部から摺動方向に、高圧・低圧と並んでおり、パターン溝により摺動方向に流路が縮小する箇所では圧力は増加し、流路が拡大する箇所では圧力が低下している。また、パターン溝の角度が大きいほど、圧力変化は大きく、周方向により大きく分布していることがわかる。

Figure 3 はパターンの溝の内部の速度場の結果を示しており、ピストンスカート表面から溝内部へ $5\ \mu\text{m}$ の位置における速度ベクトルを示している。パターンの溝に沿った流れが確認でき、摺動方向のみではなくピストンの周方向に流速の成分が発生していることがわかる。また、溝の角度 θ が 30° 、 45° のときと比べ 60° のときは速度が小さくなっていることがわかる。

Table 1 は摺動面（シリンダ側）にはたらく粘性力を示している。摺動方向にはたらく粘性力はパターンの溝の角度 θ が 30° 、 45° のときと比較して 60° のときが大きい。これは、周方向が同じ位置の摺動断面に占める溝の大きさの影響であると考えられる。また、周方向にはたらく粘性力は θ が 30° と比較して 45° 、 60° の方が大きい。粘性力の大きさは速度勾配に依存しており、潤滑油の周方向への流れの強い変化を示唆する。今回のシミュレーション結果からは、摺動方向における摩擦力が小さく、ピストンスカートの中央へ大きく流れの変化を発生させることが可能であることが示唆されたため、パターン溝を付与する角度は 45° がよいと考えられる。

4. 結言

ピストンスカートにパターンコーティングを付与したモデルを対象に潤滑油の流動状態の 3 次元シミュレーションを行うことにより、パターンコーティングの形状がピストンスカート部における潤滑油の流れや摺動特性に与える影響について以下のことを明らかにした。

- (1) 圧力分布はパターンの溝により摺動方向に流路が縮小する箇所では圧力は増加し、流路が拡大する箇所では圧力が低下する。また、パターン溝の角度が大きいほど、圧力変化は大きく、周方向により大きく分布する。
- (2) パターンの溝に沿った潤滑油の流れが確認でき、摺動方向のみではなくピストンの周方向に流速の成分が発生する。また、溝の角度 θ が 30° 、 45° のときと比べ、 60° のときは溝内の速度が小さくなっていることがわかる。
- (3) シミュレーション結果より、摺動方向における摩擦力が小さく、ピストンスカートの中央へ大きく流れの変化を発生させることが可能であることが示唆されたため、パターン溝を付与する角度は 45° がよいと考えられる。

文献

- 1) 佐藤健太，渡部旭人，葛西杜継，大木啓司，川島久宜，鈴木秀和，石間経章：パターンコーティングピストンの油膜分布におよぼすオイル性状の影響，自動車技術会論文集，54, 3 (2023) 547.
- 2) 中川拓朗，佐藤健太，川島久宜，鈴木秀和，石間経章：ピストンスカートプロファイルおよびパターンコーティングにより付加された凹部のスカート部摩擦損失に及ぼす影響，自動車技術会論文集，55, 4 (2024) 646.
- 3) 特許公報 No.5720481, No.5840881, No.6051790
- 4) 中村正明，伊東明美，菊原浩司，中鉢裕介：エンジンのピストンコーティングパターンが摩擦力および燃費におよぼす影響，自動車技術会論文集，45, 2 (2014) 171.

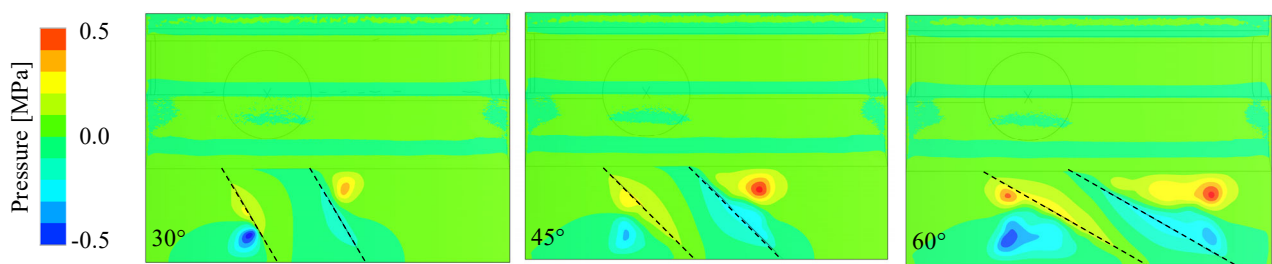


Fig. 2 Pressure distribution on sliding surface

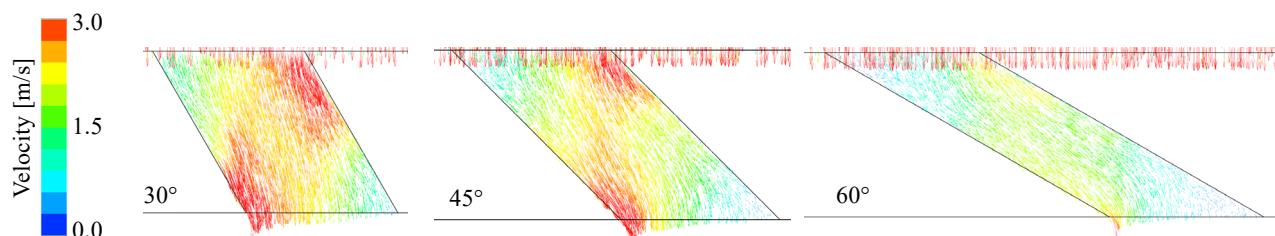


Fig. 3 Velocity vectors in groove of pattern-at $5\ \mu\text{m}$ depth from skirt surface

Table 1 Viscous forces of sliding surfaces

| Pattern angle θ [deg.] | 30 | 45 | 60 | Non |
|---|-----|------|------|------|
| Viscous force in sliding direction [kN] | 352 | 369 | 400 | 768 |
| Viscous force in circumferential direction [kN] | 7.8 | 10.4 | 10.4 | 0.48 |