

気液二相流を用いた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

Simulation of lubricating oil flow on piston skirt surface with pattern-coating using gas-liquid two-phase flow

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⁽⁵⁾．

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，スカート部にパターンコーティングを付与した三次元モデルをシミュレーション対象とし，気液二相流シミュレーションを用いてスカート部における潤滑油の流れと摺動特性に対するパターンの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 Figure 1 に示す．シミュレーションは，ピストンスカートの領域を対象とした．シミュレーションモデルは円筒形のシリンダと楕円筒形のピストンから直線的に近似した．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の配置は，左境界からパターン左上角まで a を 6 mm，上部境界からパターン中心まで b を 5 mm，とし，形状は高さ t を 4 mm，幅 w を 3 mm とした．パターンの深さ 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，潤滑油と空気の界面計算には VOF (Volume of Fluid) 法を使用した．流体は 100 °C のオイルと空気を用い，オイルは密度 ρ を 820 kg/m^3 ，粘度 η を $8.40 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ とし，空気は密度 ρ を 0.946 kg/m^3 ，粘度 η を $2.18 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，とした．またキャビテーションは考慮していない．

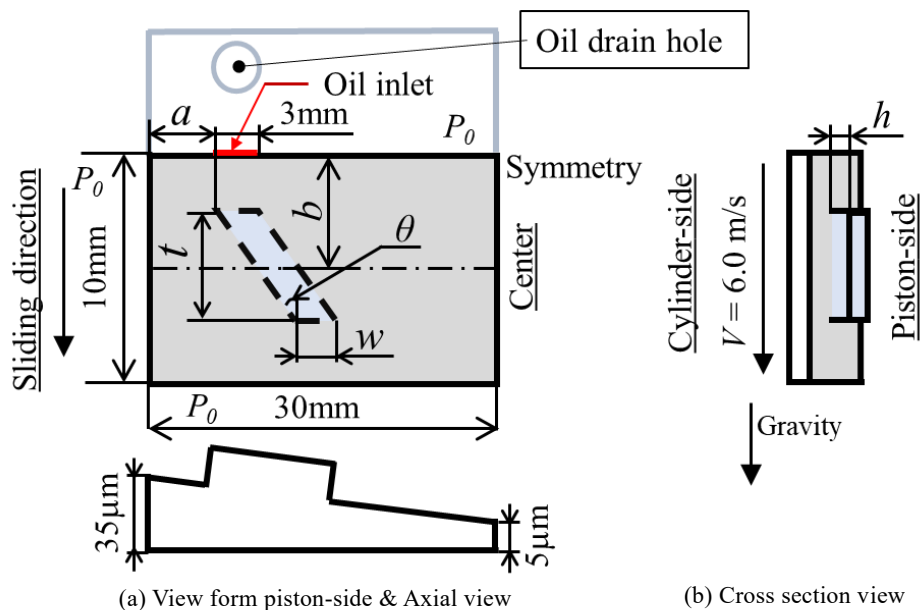


Fig. 1 Simulation overview and boundary condition

境界条件については、初期条件として領域内部に空気を配置し、上部境界の赤い線からオイルが流入するよう設定した。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、左側面境界は固定圧力 P_0 で 0 Pa とし、右側面は対称境界とした。

3. 結果と考察

Figure 2 は、パターン角度 45° の場合における固定壁面（ピストン側）から $5 \mu\text{m}$ 離れた位置での体積分率の時間推移を示している。摺動により、オイルが流動している様子が確認できる。また、パターンへの流入は 3 次元的な構造をしており、若干ではあるがパターンに沿って流動している様子が確認できる。 5 ms 後はほとんど定常状態となった。

Figure 3 は、パターン角度 45° の場合における摺動面、固定壁面（ピストン側）から $5 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m}$ 離れた位置、パターン内部での 5 ms での体積分率の瞬間値を示している。この結果より、壁面からの距離によって流動状態が異なる様子が確認できた。また、パターン上部で流路が平行に拡大する箇所では、パターンに対して内向きの流れが生じていることがわかる。

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気液二相流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) オイルの移動は摺動面の影響が支配的であり、斜め形状のパターンにより、オイルはわずかに横方向へ流れる。
- (2) 壁面からの距離によって流動状態は異なり、パターン上部で流路が平行に拡大する箇所では、パターンに対して内向きの流れが生じる。

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.
- 5) 鈴木智也, 坪井涼, 坪田頼昌: 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, トライボロジー会議 2024 秋 名護 予稿集, E45.

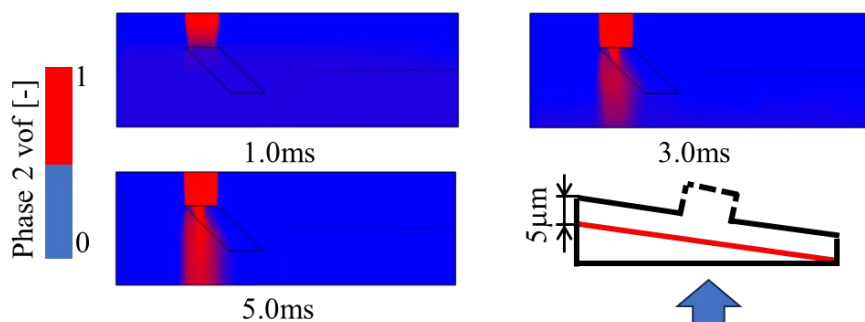


Fig. 2 Time history of volume fraction distribution of oil at 45-degree angle

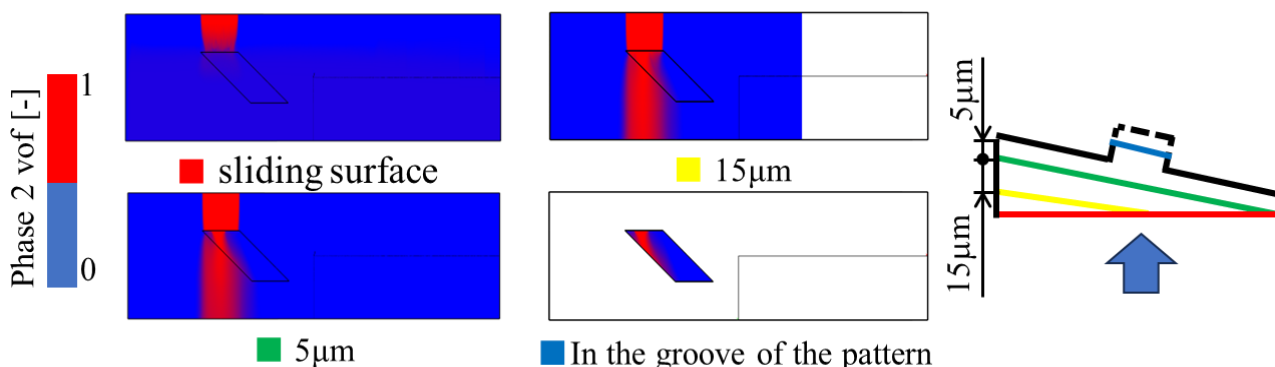


Fig. 3 Instantaneous value of volume fraction distribution of oil at time 5 ms and angle 45°