

面接触下での混合潤滑領域における マイクロディンプル効果の評価およびメカニズム解明 Micro-Dimple Effect and Its Mechanism for Friction Reduction of Plain Contact under Mixed Lubrication

京都大・工（学）*村田 誠志 京都大・工（正）平山 朋子 京都大・工（非）安達 眞聡

京都大・工（正）波多野 直也 京都大・工（非）巽 和也

ヤマハ発動機（非）藤田 英之 ヤマハ発動機（非）倉垣内 直賢

Seiji MURATA*, Tomoko HIRAYAMA*, Masato ADACHI*,

Naoya HATANO*, Kazuya TATSUMI*, Hideyuki FUJITA** and Naoyoshi KURAGAKI**

*Kyoto University, **Yamaha Motor Corporation

1. 緒言

近年、エンジンオイルの低粘度化に伴い、摺動面が境界・混合潤滑下に晒される頻度が増加しており、この領域でのさらなる摩擦低減が強く求められている。摩擦低減に及ぼすディンプルの効用については既に多くの研究がなされており、その原理としては動圧発生⁽¹⁾、接触面積削減⁽²⁾、潤滑油供給⁽³⁾、摩耗粉回収⁽⁴⁾が寄与するとされている。中でも混合潤滑下では、主に潤滑油供給と摩耗粉回収が期待される。しかし、この二つによる摩擦低減効果について定量的に評価されておらず、実現象も観測されていない。そのため、混合潤滑下でのディンプルによる摩擦低減メカニズムは依然明確になっていない。

本研究では、ディンプル部で動圧が発生しない低速・平行な面接触条件下で摩擦試験を行うことで先述二つの効果を評価した。その際、ディンプルの深さを変化させ、摩擦特性に及ぼすディンプルの最適深さを調査した。さらに、蛍光分子を溶解した潤滑油と摩耗粉を模した蛍光粒子を用いて摺動試験を行い、それらの挙動を観察することで、先述二つの現象を観測した。以上の試験により、混合潤滑下でのディンプルによる摩擦低減メカニズムの解明を試みた。

2. 摩擦試験によるディンプルの効果の評価

2.1 試験方法

低速・平行な面接触下での摩擦試験を行うため、リングオンディスク試験機を用い、試験片には SUS440C 製リングと SUJ2 製ディスクを使用した。また、ディスクにはレーザによりディンプル加工を施し、そのパラメータは直径 50 μm と面積率 10% で一定とし、深さを 2, 5, 10 μm の 3 種類に変化させた。

試験方法は、一定荷重下で摺動速度を変化させる方法と一定摺動速度下で荷重を変化させる方法の 2 通りとし、各試験条件を Table 1 に示す。速度変化による試験では、各試験片に対して 15 分かけて 1 から 300 rpm まで段階的に増速することを 1 回とし、毎回試験片を洗浄した後、次は 300 から 1 rpm まで同様に減速するといった手順を繰り返した。一方、荷重変化による試験では、摺動速度 10 rpm で一定とし、荷重を 20 から 100 N まで段階的に変化させ、合計 45 分間の試験を行った。

Table 1 Test Conditions

	Velocity varied tests	Load varied tests
Load, N (MPa)	30 (0.17)	20–100 (0.11–0.55)
Sliding velocity, rpm (mm/s)	1–300 (0.55–165)	10 (5.5)
Lubricant, μL	PAO4, 50 (0.03 Pa·s@25°C)	

2.2 摩擦試験の結果および考察

速度変化による試験結果について、各試験片で 6 回試験を繰り返したときの速度と摩擦係数の関係を Fig. 1 に示す。まずディンプル未加工面使用時は、試験を繰り返すと低速域で摩擦が減少したが、段差計により計測した表面形状から一部で大きな摩耗の存在を確認した。これは、初めは面全体で摺動していたが、試験を繰り返すうちに一部が摩耗して粗くなり、局所的に固体接触が生じたためと推測される。すなわち、摺動状態は徐々に悪化したといえる。一方、深さ 2 μm ディンプル面使用時は、低摩擦、低摩耗という良好な摺動状態が試験を繰り返しても維持された。しかしながら、深さ 5, 10 μm ディンプル面使用時は、未加工面と同様、試験を繰り返すと徐々に摺動状態が悪化する傾向にあった。また、荷重変化による試験においても結果は同様であり、深さ 2 μm ディンプル面使用時のみ摺動状態改善効果がみられ、一方深さ 5, 10 μm ディンプル面では未加工面よりも摺動状態が悪化した。

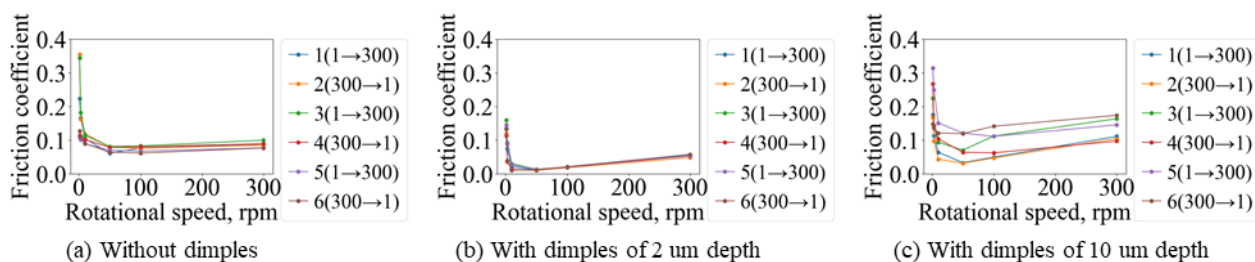


Fig. 1 Transition of friction coefficient during the repeated friction tests at various sliding velocities

3. 誘起蛍光法によるディンプルの潤滑油供給効果の評価

ディスク対ディスクの一方向摺動試験機を用い、蛍光分子 Nile Red を溶解した POE 潤滑油で摺動を行い、油膜挙動を倒立型蛍光顕微鏡（オリンパス株式会社, IX71）により観察することで、潤滑油供給効果について調査した。試験片には TEMPAX ガラス製ディスクおよび SUJ2 製ディスクを用いた。またガラス製ディスクには、摩擦試験と同様に深さのみ 2, 10 μm と変えたディンプルをエッチングにより加工した。

深さ 2, 10 μm ディンプル面使用時の摺動中のある時間に撮影した蛍光画像を Fig. 2 に示す。どちらも摺動開始時には全てのディンプル内部に潤滑油が入っていたが、その後、摺動によりディンプル前方部が負圧となることでキャビテーションが発生した。さらにその後、深さ 2 μm ディンプル面ではキャビテーション領域が徐々に拡大することで、内部に保持されていた潤滑油がディンプル外部に押し出されて連なり、Fig. 2 (a) のようにディンプル後方に蛍光強度の高い筋状の流れが形成された。これは潤滑油の染み出し現象に該当すると考えられる。一方、深さ 10 μm ディンプル面では、キャビテーションが拡大せず、潤滑油の染み出し現象も見られなかった。これは深さ 10 μm では 2 μm に比べてディンプル周りに発生する圧力の絶対値が小さく、キャビテーション圧力を下回る負圧領域も狭いためと考えられる。

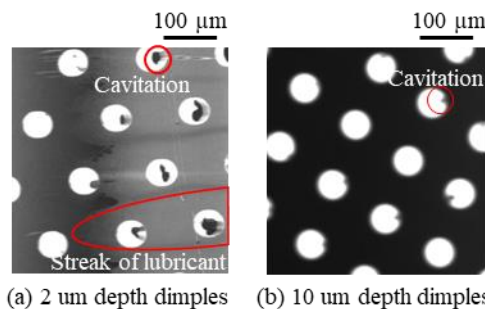


Fig. 2 Lubricant flow around dimples during sliding test

4. 誘起蛍光法によるディンプルの摩耗粉回収効果の評価

同様の方法で蛍光観察を行ったが、本試験では直径 0.8 μm の蛍光粒子（Thermo Scientific, R800）を使用した。それを摩耗粉と見立ててその挙動を追うことで摩耗粉回収効果について調査した。

まず、一つの蛍光粒子に着目し、その挙動の経時変化から粒子がディンプル内に回収される過程を確認した。これは深さ 2, 10 μm ディンプル面でともに確認された。さらに、複数回往復摺動を行った後のディンプル内に回収される粒子量を評価した。深さ 2, 10 μm ディンプル面使用時の、20 回往復摺動後の状態を Fig. 3 に示す。深さ 2 μm ディンプル面では、主にディンプルの縁に粒子が回収されたのに対し、深さ 10 μm ディンプル面では、ディンプル内部全体に粒子が回収された。これは、ディンプル深さが小さいとディンプル中央部に存在する粒子は周囲の流れによりディンプル外部に流出しやすいためだと考えられる。よって、ディンプル深さが大きいほど回収量が多いと推測される。

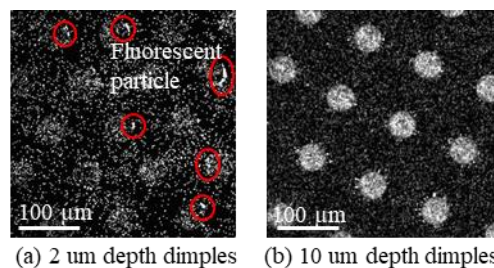


Fig. 3 Accumulation of fluorescent particles in dimples after 20 reciprocating sliding tests

5. 結言

- ディンプル部で動圧が発生しない条件下での摩擦試験により、潤滑油供給および摩耗粉回収による摩擦低減効果を評価した結果、ディンプル深さによる効果の差異が確認された。
- 誘起蛍光法を用いて摺動面の観察を行った結果、潤滑油の染み出し現象はディンプル部でキャビテーションが拡大する条件下でのみ発生し、摩耗粉の回収量はディンプル深さが大きいほど多いと推測された。
- 本リングオンディスク試験で発揮された摩擦低減効果は、潤滑油供給によるものが支配的であり、摩耗粉回収が摩擦特性に及ぼす影響は小さいと示唆された。

文献

- 1) Y. Qiu & M. M. Khonsari: On the Prediction of Cavitation in Dimples Using a Mass-Conservative Algorithm, Journal of Tribology, 131, 4 (2009) 041702.
- 2) 浦辺・村田: 自動車用シリンダボアのディンプル状マイクロテクスチャによるピストンリングの摩擦低減, トライボロジスト, 64, 7 (2019) 413.
- 3) Y. Wan, and D. -S. Xiong: The effect of laser surface texturing on frictional performance of face seal, Journal of materials processing technology, 197, 1-3 (2008), 96.
- 4) M. Varenberg, G. Halperin & I. Etsion: Different aspects of the role of wear debris in fretting wear, Wear, 252 (2002), 902.