

レーザ誘起蛍光法による混合潤滑領域下での ディンプル周りの油膜挙動の観察

Mechanism of Thicker Oil Film Formation Caused by Micro-Dimples
Elucidated by Direct Observation with Laser-Induced Fluorescence

京都大・工（学）*酒井 優徳 京都大・工（正）山下 直輝 京都大・工（正）平山 朋子
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
Masanori SAKAI*, Naoki YAMASHITA*, Tomoko HITRAYAMA*
Naoya HARTANO*, Kazuya TATSUMI*
Hideyuki FUJITA** and Naoyoshi KURAGAKI**
*Kyoto University, **Yamaha Motor Corporation

1. 緒言

近年、エンジンの低粘度化やエンジンの始動・停止回数の多いHV車、IS車の普及に伴い、境界・混合潤滑状態での摩擦・摩耗特性の向上が要求されている。ディンプルの摩擦低減効果に関しては多くの先行研究がなされており、特に混合潤滑下で期待されている効果の1つとして、ディンプルからの摺動面への潤滑油供給効果が挙げられる。

本研究ではディンプル部での動圧発生が十分に小さい低速・平行な面接触条件下で摩擦試験を行うことで、ディンプル深さの違いによる摩擦低減効果の差異を評価した。さらに、倒立型蛍光顕微鏡と蛍光分子を溶解させた潤滑油を用いて同様の条件下・摺動状態における摺動面の蛍光観察を行うことで、ディンプル深さの違いによる油膜挙動の差異を評価した。以上の試験により、ディンプル深さの違いによる摩擦低減効果の差異のメカニズム解明を試みた。

2. 摩擦試験によるディンプルの摩擦低減効果の評価

2.1 試験方法

リングオンディスク型の摺動試験機を用いて低速・平行な面接触下での摩擦試験を行った。試験片にはSUS440C製のリング試験片とSUJ2製のディスク試験片を使用した。ディスクにはレーザによるディンプル加工が施されており、そのディンプル直径と面積率は50μmと10%で固定として、深さのみ0.6, 0.9, 1.1μmの3通りに変化させたものを用意した。

本研究では、一定荷重下で摺動速度を段階的に変化させて試験を行った。1試験片ごとに15分かけて1から300rpmの間で段階的に速度を増加させる試験を行い、その後、300rpmから1rpmへ同様に減速させる試験を行った。なお試験に際しては、増速試験および減速試験のそれぞれが1回終わるたびに試験片を試験装置から取り外して洗浄を行った。これは、摺動によって生じる摩耗粉の噛みこみを防ぐことで試験結果の再現性を担保し、ディンプルそのものによる潤滑特性への寄与を正確に評価するためである。

2.2 摩擦試験の結果および先行研究との比較

摩擦試験の結果について、各試験片で6回試験を繰り返した時の速度と摩擦係数の関係をFig.1に示す。これより、ディンプル深さを0.6, 0.9, 1.1μmの3通りに変化させた中では1.1μmの結果が最も安定して低摩擦であることが見て取れる。一方、当研究室で行った過去の研究により、ディンプル深さを2, 5, 10μmと変化させたものの中では深さ2μmのものが最も摩擦係数が低くなることが示されている[1]。またその理由として、ディンプル深さを2μm近傍としたときに最も負圧の程度が大きくなることから、ディンプル内におけるキャビテーションの発生が潤滑特性向上に寄与していることも分かっている。そこでキャビテーションの発生が潤滑特性にどのように効いているのかを確認すべく、蛍光顕微鏡を用いてディンプル周りの潤滑油の流れを可視化することとした。

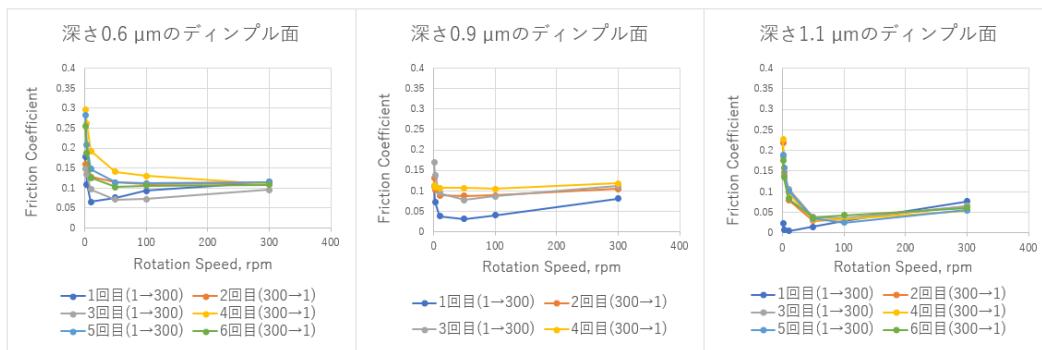


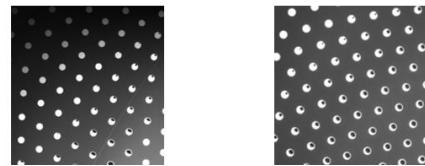
Fig.1 Transition of friction coefficient during the repeated friction tests at various sliding velocities

3. レーザ誘起蛍光法を用いたディンプル回りの油膜挙動の評価

蛍光顕微鏡に設置可能なリングオンディスク型摺動試験機を新たに用意し、実験を行った。潤滑油には蛍光分子であるNile Redを溶解させたものを用い、SUJ2製のリングとTEMPAXガラス製のディスク間に挟んで摺動試験を行うことで油膜挙動の観察を行った。なお、蛍光顕微鏡には、倒立型蛍光顕微鏡（IX71, Olympus）を使用した。ガラスディスクには、あらかじめエッチング法により深さ3, 10μmのディンプル加工を施した。

3.1 ディンプル深さの違いによる油膜挙動の差異

深さ3, 10μmのディンプル試験片をそれぞれ使用したときの蛍光観察画像をFig.2に示す。これは、ディンプル内に最も潤滑油が流入した瞬間の撮影画像である。どちらも摺動開始時には全てのディンプル内部が潤滑油で満たされていたが、摺動速度の増加に伴いディンプル内部に負圧が発生することでキャビテーションが生成した。その後、リング試験片の回転と同期してディンプル内部からのキャビテーションの染み出し、消滅、生成が繰り返されるが、ディンプル深さ3μmの試験片ではディンプル内に生成したキャビテーションの全てが隙間に染み出し、その後潤滑油が再びディンプル内部に流入する様子が見られた一方、ディンプル深さ10μmの試験片では、ディンプル内に生成したキャビテーションのうちの一部は隙間に染み出すことなくディンプル内部に留まっている様子が見られた。このことから、ディンプル深さ3μmの試験片の方が10μmの試験片と比較してキャビテーションの染み出しに伴うディンプルへの油の流入と流出が潤滑に行われていると言える。



(a) 3μm dimple depth (b) 10μm dimple depth

Fig.2 Difference in amount of lubricant inside dimples

Fig.2に示すように、ディンプル深さ3μmの試験片ではディンプル内に生成したキャビテーションの全てが隙間に染み出し、その後潤滑油が再びディンプル内部に流入する様子が見られた一方、ディンプル深さ10μmの試験片では、ディンプル内に生成したキャビテーションのうちの一部は隙間に染み出すことなくディンプル内部に留まっている様子が見られた。このことから、ディンプル深さ3μmの試験片の方が10μmの試験片と比較してキャビテーションの染み出しに伴うディンプルへの油の流入と流出が潤滑に行われていると言える。

3.2 キャビテーション生成サイクルにおける油膜挙動の様子

ディンプル内部にてキャビテーションが生成、染み出し、消滅して再び生成するまでをキャビテーション生成の1サイクルとし、その間の油膜挙動の変化の様子を観察した。その際に、キャビテーションが生成している領域周辺の隙間部（非ディンプル部）の明るさやキャビテーションの

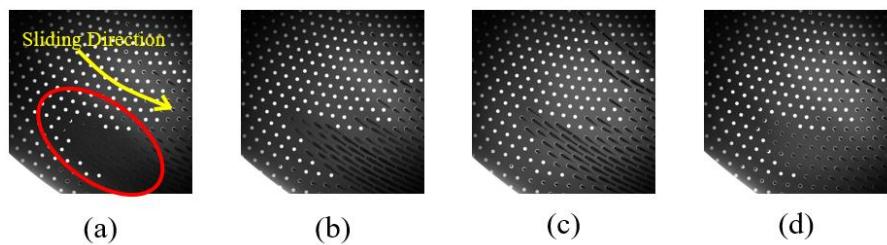


Fig.3 Brightness variation during cavitation generation

染み出しの量に着目したところ、1サイクルは大きく分けてFig.3(a)～(d)に示す4状態から成り立っていることが分かった。なおFig.3は、リング試験片が反時計回りに摺動した際のディスク試験片上のある場所における時間変化の様子を示している。まず(a)では、赤丸で囲んだ隙間部（非ディンプル部）が相対的に暗くなっていることから、油膜が薄い状態であることが分かる。次に(b)ではディンプル内部からキャビテーションが染み出すのに伴い隙間部（非ディンプル部）が明るくなっている。これはすなわち、油膜厚さが増大していると言える。次に(c)ではさらに隙間部（非ディンプル部）が明るくなっているが、キャビテーションの染み出し量は(b)と比べて僅かではあるが減少している。最後に(d)ではキャビテーションの染み出しがなくなると共に隙間部（非ディンプル部）が暗くなり始めている。(d)の後、時間が経過すると再び(a)の状態へ遷移し、その後(b)→(c)→(d)→…と繰り返される様子が観察された。これより、元の試験片のうねりや設置精度限界による油膜厚さの変動に伴い、特に隙間が狭くなった時にディンプル内に負圧が発生することでキャビテーションが生成し、そのキャビテーションの染み出しにより隙間部に筋状のキャビテーション領域ができる。これが潤滑油の流れを空間的に妨げることで、油膜厚さを厚くするというサイクルを確認することができたと言える。また、ディンプル深さの差異による傾向が摩擦試験結果と一致していることから、キャビテーションの染み出しに起因する油膜厚さの増大が摩擦特性向上に寄与していることが分かった。

4. 結言

- リングオンディスク試験機を用いた摩擦試験結果より、油膜が十分に薄い混合潤滑下における最適なディンプル深さは1~2μm近傍にあることが示された。
- レーザ誘起蛍光法を用いて摺動面の蛍光観察を行った結果、ディンプル深さが3μmの試験片の方が10μmの試験片と比べてキャビテーションの染み出しが顕著であることが確認された。これは摩擦試験から推定された最適なディンプル深さの傾向と概ね一致している。
- キャビテーション生成サイクルにおける油膜挙動の様子を観察することで、油膜厚さの変動に伴いキャビテーションが生成し、それが隙間部で筋状になって潤滑油の流れを空間的に妨げることで、油膜厚さの増大をもたらす様子が見られた。

参考文献

- [1] 村田ら, トライボロジー会議 2022 春予稿集(2022).