

潤滑下のDLC膜の密着力に及ぼす相手ボール材の添加剤反応性やヤング率の影響

Effect of Additive Reactivity and Young's Modulus of Mating Ball Material on Adhesion Strength of DLC Film under Lubrication

宇都宮大・YIZHI FENG(正) 宇都宮大・馬渕 豊(正) 日産自動車・池原賢亮(非) 日産自動車・浅島寛貴(正)
日産自動車・小林誠(正)

YIZHI FENG*, Yutaka Mabuchi*, Kensuke Ikebara**, Hiroki Asajima**, Makoto Kobayashi**
Utsunomiya University*, Nissan Motor Co., Ltd.**

1 背景

地球温暖化対応としての CO₂排出量の削減や、昨今の燃料費高騰も相まって、自動車では省燃費性の向上が最重要課題とされている。エンジン内部の摩擦損失は自動車全体の機械的損失の約 20%を占め、ここでの摩擦損失を軽減することで、車両の省燃費性向上に繋がる。高硬度、低摩擦のダイヤモンドライクカーボン (Diamond-like carbon) 膜は、潤滑下の摩擦低減に有効で、近年エンジン部品への適用が進んでいる¹⁾。DLC 膜は基材の鋼との熱膨張差により高い内部応力を生じるため、界面の密着力の管理が重要である。これまでエンジンの部品評価と相關のある、潤滑下の Pin/Disk 試験機を用いた DLC 膜の密着力評価法を開発し、規格化の検討を進めている。一方、DLC 膜の密着力評価に適用先の油種を用いる場合もあるため、予め油種及び含まれる添加剤の影響を把握しておく必要がある。先行研究では油種の影響を一定条件の下で比較し、試験後の表面粗さと摩耗によるボールの曲率変化を考慮した潤滑状態 Δ を算出し、剥離発生荷重を整理できることを示した²⁾。本報ではより広範囲な条件にて Δ による整理が可能かを確かめるため、鋼ボールに加え窒化ケイ素ボールによる評価、異なる油温条件での評価を行い検証した。

2 実験方法

DLC 膜の基材に SUJ2 製 HRC64、表面粗さ Ra0.01 以下のディスクを用いた。DLC 膜にはアーキオノンプレーティング法による ta-C 膜を用いた(膜厚 1 μm)。DLC 膜の相手材に、ペアリング用の 3/8 インチ SUJ2 製鋼ボール、これに加え窒化ケイ素(Si₃N₄)ボールを用いた。DLC 膜の剥離検知は、治具に AE センサ(富士セラミクス 204A)を固定し、AE 法により検知した。

潤滑油はポリアルファオレフィン(PAO4, PAO8: 基油), PAO4/PAO8 にグリセリンモノオレート(GMO)を 1wt% 添加した PAO-GMO, ジチオリン酸亜鉛(ZnDTP)を含んだ市販 0W20 エンジン油(Pennzoil 製 GF-5 0W20), 極圧添加剤 MoDTC をエンジン油に添加した MoDTC 添加油の 6 油種で比較を行った。表面粗さの計測にはオリンパス製レーザー顕微鏡 (OLS4000-SAT), 表面分析に日立製卓上 SEM (TM3000), 英国オックスフォードインストゥルメンツ製 EDX (SwiftED3000) を用いた。また、摩耗痕曲面の高さは干渉計測装置 (Zygo NewView7300) を用いて評価した。

3 試験結果

3. 1 密着力試験

各油種の試験結果を図 1 に示す。鋼ボールでは、油種により大きく剥離発生荷重は変化し、MoDTC 添加で最も高い値を示した。一方、窒化ケイ素では油種の影響はほとんどなく、また剥離荷重は低い値を示した。

3. 2 ボール摩耗痕観察

表面応力 σ_x 及び膜厚比 Δ の算出のため、摩擦試験を行った試験後のボールの形状測定を行った。ボールの滑り方向の摩耗痕径を白色干渉計測装置 (zygo) で観察し、曲率を算出した。

図2に試験後のボールの曲率を示す。鋼ボールの場合いずれも曲率が増大し、特に ZnDTP を含むエンジン油、MoDTCにおいてその傾向が大きい。これらは化学吸着を示す添加剤で、反応と共に摩耗が進み、曲率が増大したと考えられる。一方、ZnDTP, MoDTC 由来の添加元素の窒化ケイ素への吸着は、鋼に比べて僅かで無視できるレベルであった。窒化ケイ素は高硬度以上、反応性が低いため曲率変化は少ない。

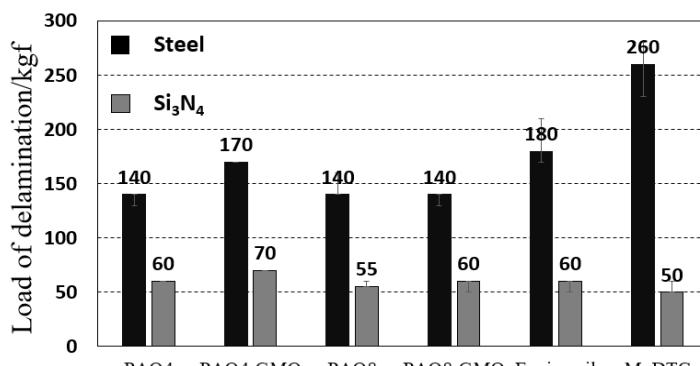


Fig.1 Summary of averaged friction coefficient and adhesion strength.

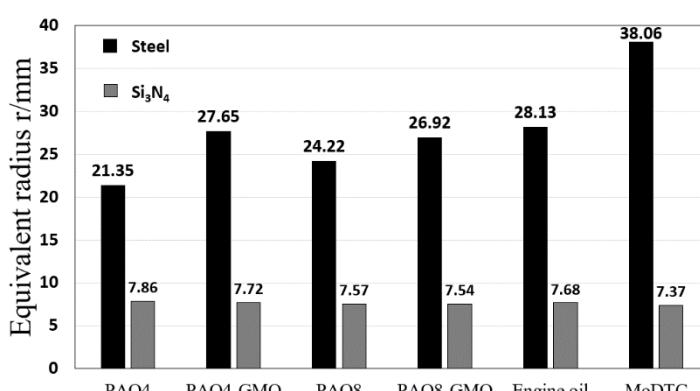


Fig.2 Comparison of Equivalent radius r.

3. 3 表面の引張応力 σ_x

接線力(=摩擦力)を考慮した表面引張応力 $\sigma_x(z=0, x=-a)$ を算出し³⁾、剥離発生荷重を整理した結果を図 3 に示す。鋼ボールの場合、 σ_x が大きいほど、剥離荷重の低い傾向が認められたが、窒化ケイ素ボールの場合、 σ_x と剥離荷重の間に相関が認められなかった。ヤング率の違いから全般的には右肩下がりの傾向があるが、相関性は低い。

3. 4 膜厚比 Λ

試験後のボール接点の曲率および表面粗さが異なるため、試験中の潤滑状態はそれぞれ異なる。潤滑状態を示す指標の膜厚比 Λ は、最小油膜厚さ h_{min} をボールと DLC 膜の合成表面粗さで割った値で、図 4 に各油種の剥離発生荷重を Λ で整理した結果を示す。 Λ と剥離発生荷重は良い相関を示した。また、鋼ボール、PAO8 を用いて 60°C から 20°C おきに 120°C まで油温を変えた試験結果も、この傾向とほぼ一致した。

4 考察

図 5 にヤング率及びボール接点の曲率を変えた場合の最小油膜厚さ h_{min} を算出し（図中点線）、ここに今回の結果を加えて整理した。この図より、任意のヤング率の材料をボールとして用いた場合、摩擦試験後の曲率が分かれば h_{min} を推定でき、また表面粗さが分かれば Λ が算出できるため、図 4 の関係から剥離荷重が推定できることとなる。逆に、油種や試験条件が異なる剥離荷重の比較も、関係式を基に、有意差を判定することが可能となる。

5 まとめ

6 種類の油種、鋼ボール及び窒化ケイ素ボールを用いた剥離試験、及び油温を変えた剥離試験を行い以下の知見を得た。

- (1) 油種の影響の大きい鋼ボールに対し、窒化ケイ素ボールでは油種の影響がほぼなく、低い密着力を示す。
- (2) これらを Λ で整理した結果、剥離荷重との間に良い相関が認められ、試験中の曲率変化や粗さ変化、ボールのヤング率を考慮した Λ の整理の有効性を示した。
- (3) 油温違いも同様で、ほぼ同一の分布上にプロットすることができ、油種の反応性やボールの材質を越えた範囲においても Λ により整理できることを示した。

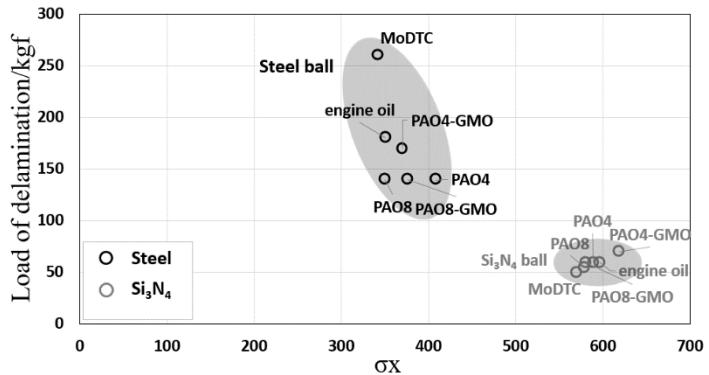


Fig.3 Relationship between stress σ_x and adhesion strength

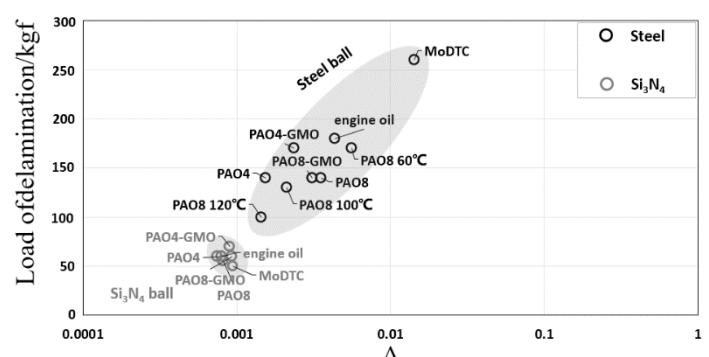


Fig.4 Relationship between lambda ratio Λ and adhesion strength.

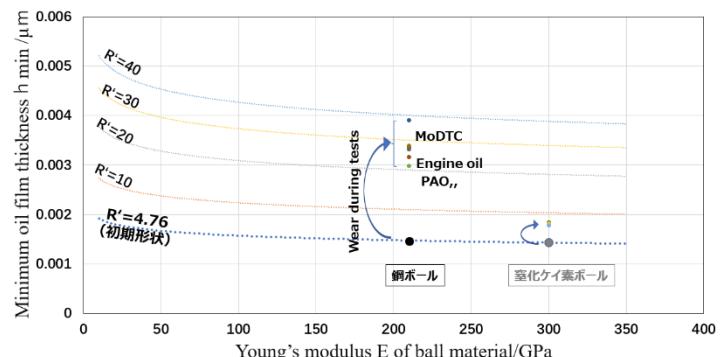


Fig.5 Relationship between Young's modulus E and minimum oil film thickness h_{min} .

6 参考文献

- 1) 馬渕、トライボロジスト、58、8(2013)p557-565.
- 2) Yutaka Mabuchi et. al., ICSIF, 3rd (2021) p44-47.
- 3) G M Hamilton, I Mech E, Proc Instn Mech Engrs Vol 197C, (1983) p53-59.