

自動車をはじめ様々な機械要素を構成する部材ではその動力を伝達するためにしゅう動部を有している。これらの機械要素を長期間使用するためには、しゅう動部の摩耗や焼付きを抑制し摩擦特性を適切に制御する必要があり、各しゅう動部には潤滑剤や表面処理が適用されている。

これらの機械要素のしゅう動特性の評価手法のうちベンチ試験やフィールド試験により評価を行うと膨大なコストや時間を要し、また、しゅう動部以外からの外乱因子が影響する。このため、比較的短時間かつ低コストであるモデル試験での評価が重要となるが、実機との相関性や信頼性が低下してしまう。したがって、モデル試験などでしゅう動特性を評価する際には試験形態、測定方法および試験条件などを考慮し、相関性や信頼性を高める工夫が必要となる。

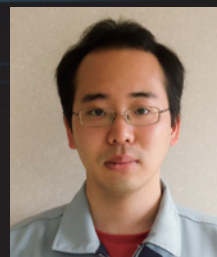
本稿では潤滑油環境下におけるしゅう動特性評価手法について潤滑状態を考慮した場合の評価事例およびしゅう動部調査事例を紹介する。



技術本部
材料評価事業部
腐食防食技術部
古垣 孝志



技術本部
加古川事業所
技術室
味田 晋之介



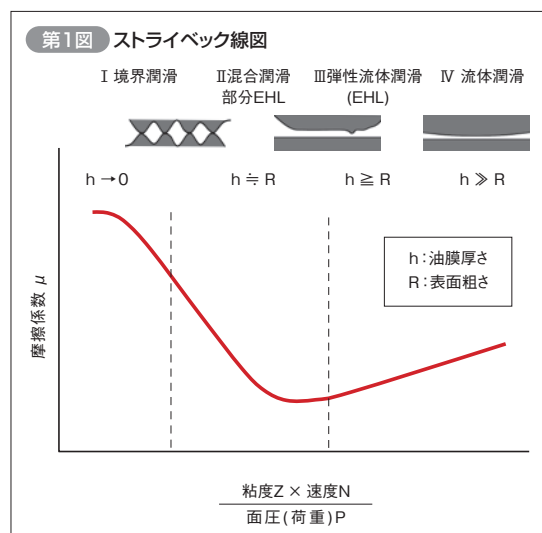
技術本部
高砂事業所
技術室
富山 高明

B-1 潤滑状態の把握としゅう動特性

1-1 油膜厚さの計算と潤滑状態

第1図に潤滑状態と摩擦係数の関係を示すストライベック線図を示す。潤滑油環境下におけるしゅう動部での摩擦の状態は(I)境界潤滑、(II)混合潤滑、(III)弾性流体潤滑および(IV)流体潤滑で構成されており、各しゅう動部によって潤滑状態が異なるため、しゅう動特性を評価する際には実機と潤滑状態を合わせる必要がある。

この潤滑状態を判断するパラメータの一つに油膜厚さ h があり、点接触や線接触における油膜厚さ h の計算



方法として、高圧力下での潤滑面の弾性変形と潤滑油の粘度上昇を考慮した弾性流体潤滑(EHL: Elastohydrodynamic Lubrication)下における膜厚計算式が用いられる*1)。第1表に点接触におけるHamrock-Dowsonの膜厚計算式を示す。ここで得られた油膜厚さ h としゅう動面の表面粗さの標準偏差から算出した膜厚比 λ から潤滑状態を推定することができる。

1-2 評価事例

EHL下におけるしゅう動特性評価事例として高千穂精機(株)製ピン・チップオンディスク試験機を用いてしゅう動試験を行った。試験片材質はSUJ2あるいはSUJ2にUBMS(Unbalanced Magnetron Sputtering)法によりDLC(Diamond-Like Carbon)膜を形成したものを用いた。また、ピン試験片は先端18mmの球面に加工して点接触させた。試験条件は荷重3000N一定、速度10.0m/s一定、試験時間60minとし、潤滑油に合成炭化水素であるPAO(Poly-alpha-olefin)を用いた。本試験における計算上の油膜厚さは $0.09\mu\text{m}$ であり、膜厚比 $\lambda=2.12$ であることから試験初期はEHL下における評価となる。

第2図に摩擦係数曲線、第3図に試験後のしゅう動部拡大観察結果を示す。ピンおよびディスクともにDLCを用いた組み合わせAの場合、摩擦係数は0.017程度で安定していた。また、試験後のしゅう動部の拡大観察よ

参考文献

- *1)
杉村文一: EHL膜厚計算式、
トライボロジスト、第49巻、
第10号(2004)、pp.799-
800

第1表 膜厚計算式

潤滑領域	膜厚計算式
IR 等粘度-剛体領域	$h_{\min} = h_c = 128 \beta U^2 W^{-2} \left\{ 1 + \frac{2}{3\beta} \right\}^{-2} \left\{ 0.131 \tan^{-1} \frac{\beta}{2} + 1.683 \right\}^2$
PR 高压粘度-剛体領域	$h_{\min} = h_c = 1.66 (GU)^{2/3} (1 - e^{-0.68k})$
IE 等粘度-弾性体領域	$h_{\min} = 7.43 U^{0.65} W^{-0.21} (1 - 0.85 e^{-0.31k})$ $h_c = 7.32 U^{0.64} W^{-0.22} (1 - 0.72 e^{-0.28k})$
PE 高压粘度-弾性体領域	$h_{\min} = 3.68 U^{0.68} G^{0.49} W^{-0.073} (1 - e^{-0.67k})$ $h_c = 4.31 U^{0.68} G^{0.49} W^{-0.073} (1 - e^{-1.23k})$

速度パラメータ $U = \eta_0 u / (ERx)$

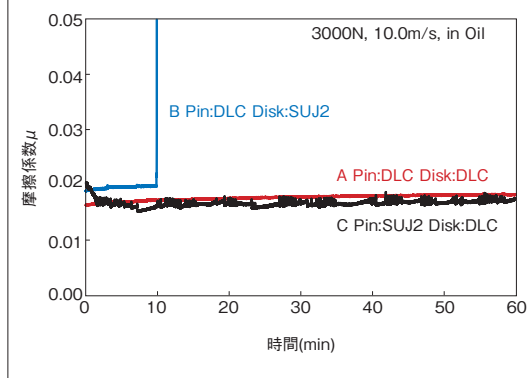
荷重パラメータ $W = w / (ERx^2)$

材料パラメータ $G = \alpha E$

大気圧下の粘度 η_0 、粘度圧力係数 α 、平均速度 u 、等価弾性係数 E
等価曲率半径 R_x 、荷重 w 、曲率半径の比 β 、

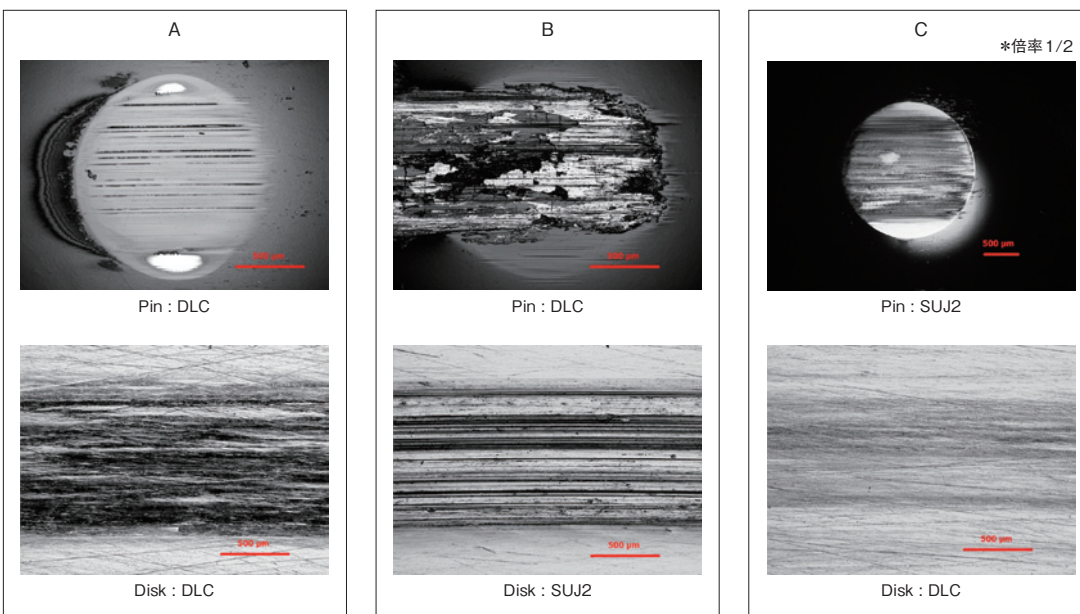
り、ピンおよびディスクともにしゅう動痕が認められた。ピン試験片のしゅう動痕は円形を呈しており、しゅう動痕両端部においてDLCが摩耗し基材が露出していた。山本らによると点接触における接触域内の膜厚はほぼ一様であるが、流体の流出部に膜厚低下部が存在するため、馬蹄形状の薄膜部を持つ油膜分布となるとされている*2)。本結果ではしゅう動中に弾性変形していることに加えてEHL下において生じる馬蹄形状の膜厚分布の薄膜部が最も摩耗したと推察された。一方、ピン試験片のみDLCを用いた組み合わせBの場合、試験開始から10min程度で焼付きが生じ、ピン試験片には相手材 (SUJ2) の移着が認められた。ディスク試験片のみにDLCを用いた組み合わせCの場合、摩擦係数は多少変動しているものの組み合わせAと同程度の値で推移していた。以上より、潤滑油環境下において目的

第2図 摩擦係数曲線



の潤滑状態でしゅう動特性を評価することが可能であることが確認された。

第3図 試験後のしゅう動部拡大写真



参考文献

- *2)
山本雄二、他トライボロジー、
(1998)、p.122,理工学社

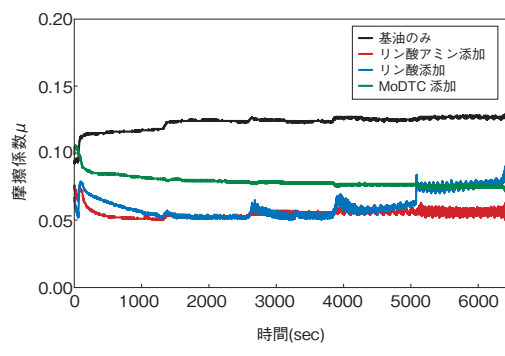
B-2 しゅう動特性に及ぼす添加剤の影響

2-1 しゅう動特性評価結果

潤滑油環境下におけるDLC膜のしゅう動特性に及ぼす添加剤の影響を調査するために、神鋼造機(株)製摩擦摩耗試験機を用いてベンオンディスク試験を行った。ベンオン試験片にはSUJ2、ディスク試験片にはUBMS法により形成したDLC膜をコーティングしたものを用い、潤滑油は、PAOを潤滑油基油としてリン酸アミン、リン酸、MoDTC (molybdenum dithiocarbamate)をPAOに対しておのおの1wt%添加した。試験条件は荷重250N、滑り速度を0.09、0.07、0.05、0.03、0.02m/sと低下させた。本試験における膜厚比 λ は1以下であるため境界潤滑域となる。

第4図に摩擦係数曲線を示す。基油のみの場合、試験初期から摩擦係数は0.10以上を示すべり速

第4図 摩擦係数曲線

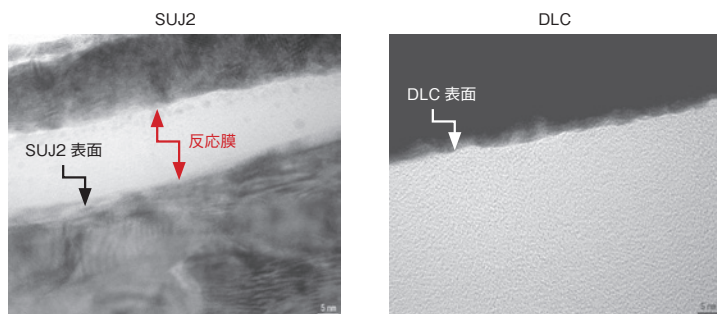


度低下に伴い増加する傾向が認められた。一方、リン酸アミンを添加した場合、試験初期から摩擦係数は0.05程度を示し滑り速度が低下しても摩擦係数は低い値を示した。リン酸を添加した場合においては試験時間5000秒程度まではリン酸アミンと同程度の摩擦係数を示したがそれ以降は増加した。極圧剤として用いられるMoDTCを添加した場合、基油のみに比べて摩擦係数は低い値を示したものの、リン酸アミンを添加した場合より全体的に摩擦係数は高い値を示した。これらの摩擦係数低減効果はしゅう動部表面に添加剤由来成分の反応膜によるものと推察された*3)*4)。

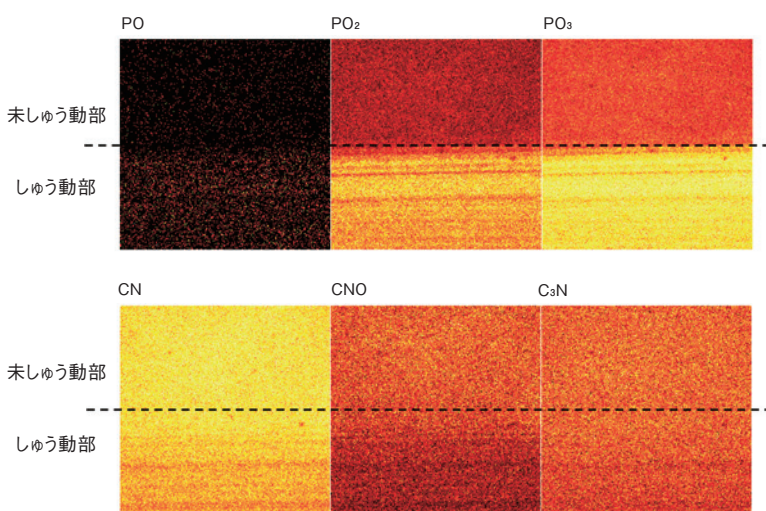
参考文献

- *3) 古垣孝志、他：日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集、Vol.2008-9、(2008.09.01)、pp.209-210
*4) 古垣孝志、他：日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集、Vol.2009-5、(2009.04.24)、pp.203-204

第5図 しゅう動部の断面TEM観察結果



第6図 しゅう動部/未しゅう動部界面のToF-SIMS分析結果(DLC)



2-2 しゅう動部表面分析

第5図にしゅう動部の断面TEM観察結果を示す。しゅう動試験において摩擦係数低減効果が顕著であったリン酸アミンを添加した場合、SUJ2表面には厚さ10~20nm程度のP-Oを主体とする反応膜が認められた。一方、DLC表面にはSUJ2表面で観察されたような反応膜は認められなかった。第6図にDLCしゅう動部/未しゅう動部界面のToF-SIMS分析結果を示す。断面TEM観察では反応膜は観察されなかったものの、リン酸由来成分である PO_2 および PO_3 が濃化し、アミン由来成分と考えられるCN、CNOおよび C_3N が試料表面に存在していた。以上より、リン酸アミンによる摩擦係数低減効果として両しゅう動部に反応膜が形成することに加え、アミン成分がDLC表面に吸着することが要因であると推察された。

当社は、摩擦摩耗試験機をはじめ種々のトライボロジー関連評価設備を保有しており、本稿で紹介したような基礎的な理論や技術を組み合わせることで、これまで多くの評価を行ってきた。今後は、テクスチャ

リング、フレットイング、異物混入および油膜可視化といった最新技術に対する評価技術を高度化させ、各分野のお客様のニーズに応えていきたいと考えている。