

フラーレン添加油におけるトライボロジー特性に及ぼす表面形状の影響
Influence of surface roughness parameters on tribological properties in fullerene-added oil

福井大・工（院）*名口 裕美 福井大・工（正）本田 知己 福井大（正）今 智彦

Yumi Naguchi, Tomomi Honda, Tomohiko Kon

University of Fukui

1. 緒言

近年普及が進んでいるハイブリッド車などのエンジンには内燃機関とモータの両方が搭載されており、エンジンがこれまでより低い回転数で用いられるようになってきている。そのため、従来のエンジンと比較して低温域（約 40~50 ℃）での稼働が想定される。しかし従来の添加剤には低温域で効果を発揮しないものや動作不良、環境汚染につながるものもあり、それらに代わる新たな添加剤が求められている。

そこで耐荷重性、熱安定性、安全性が高いフラーレン（FLN）が新たな多機能添加剤として期待されている。先行研究⁽¹⁾より FLN 添加油において、試験片の表面形状と摩擦係数には関係性があることが示唆され、Ra 値の異なる試験片を使用した研究では、FLN 添加油の摩擦低減作用にはプラトー構造表面が有効であると報告されている⁽²⁾。しかし、FLN 添加油における低摩擦発現の条件や表面形状とトライボロジー特性の関係は未だ明らかにされておらず、定量的な表面設計解は得られていない。そこで本研究では、試験片の表面粗さを変化させて試験を行うことで、粗さパラメータが FLN 添加油におけるトライボロジー特性に及ぼす影響を調査し、FLN 添加油による摩擦低減機構を解明することを目的とする。

2. 試験方法および供試材料

2.1 試験概要

FLN 添加油の摩擦特性に及ぼす表面形状の影響を調査するために、試験片の表面形状を変化させ、15 種類の表面粗さパラメータを測定した後に往復しゅう動試験を行った。まず、平板試験片にラッピング仕上げを施した後にブラスト処理により方向性のない仕上げを行い、算術平均粗さ Ra の値が異なる表面（Ra=0.72, 1.53, 1.87, 2.63 μm）を用意した。いずれの試験片も Ra/Rz の値は約 0.1 である。粗さパラメータにはそれぞれ相関関係があり、全てを任意の値に調整することが難しいため、自身での操作が可能な高さ方向のパラメータである Rz を指標に用いた。処女面の Rz を 1 としたとき、それぞれ 3/4, 1/2, 3/8, 1/4, 1/8 を目安に研磨を施し、所望のプラトー構造表面をもつ試験片を自作した。

試験片 A~V のしゅう動方向の断面曲線を Fig. 1 に示す。一番左の列の Ra は未研磨の試験片（A, F, K, Q）における値である。線粗さパラメータである最大山高さ Rp, 最大谷深さ Rv, 最大高さ Rz, 算術平均粗さ Ra, 二乗平均平方根粗さ Rq, スキューネス Rsk, クルトシス Rku, 平均長さ Rsm, 二乗平均平方根傾斜 RΔq, 切断レベル差 Rδc, プラトー構造表面パラメータ Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2 をレーザ顕微鏡で測定した。

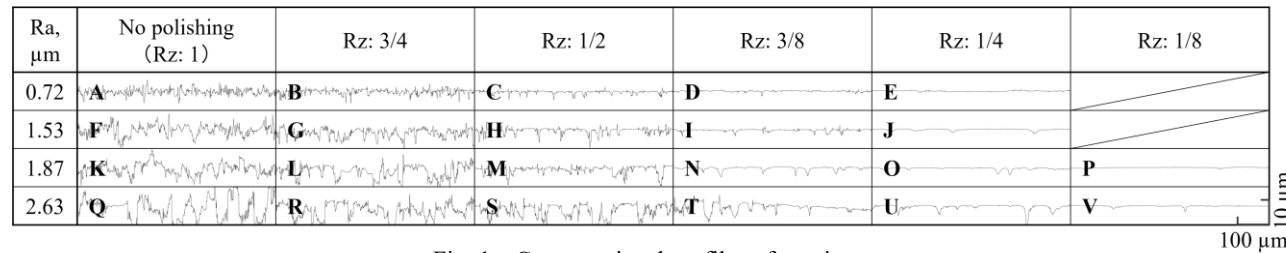


Fig. 1 Cross sectional profiles of specimens

2.2 試験装置および試験条件

本研究で用いた往復動摩擦摩耗試験機は、一定速度で左右に往復運動する台に留め具を用いてプレート試験片を固定し、相手材となるボール試験片に分銅を用いて押し付け荷重を加えて往復すべりしゅう動させる方式である。摩擦係数はアーム状のロードセルにより検出された摩擦力を荷重で除した値として測定される。試験条件を Table 1 に示す。

2.3 供試材料

ボールおよびプレート試験片には高炭素クロム軸受鋼 SUJ2（縦弾性係数：207 GPa, ポアソン比：0.30）を用いた。ボール試験片の寸法は直径 10 mm, 28 等級（Ra=0.05 μm）, プレート試験片の寸法は 60 mm×30 mm×厚さ 3 mm である。試料油には、パラフィン系炭化水素合成油 PAO4（動粘度：40.5 mm²/s@20 ℃, 粘度指数：122）および、それにミックスフラーレン（C60：50~60 %, C70：15~25 %, その他高次 FLN）を 1000 ppm の割合で添加したものを用いた。

Table 1 Test conditions

Test temperature, °C	20±3
Relative humidity, %RH	<50
Sliding velocity, mm/min	2400
Stroke, mm	20
No. of cycles	4000
Load, N	1
Amount of lubricant, mL	5.0~1.0

3. 試験結果

各試験片の基油および FLN 添加油における定常摩擦係数 (往復しゅう動回数 3801~4000 cycles における平均値) および摩耗量より算出した, 基油に対する FLN 添加油の低減割合を Fig. 2 に示す. 両者の値が正であった試験片では, 往復しゅう動回数が 500 cycles 前後から基油の摩擦係数が上昇したのに対して, FLN 添加油の摩擦係数は常に一定の低い値を維持することで低摩擦を発現した.

4. 考察

4.1 粗さパラメータおよび摩擦係数の関係

FLN 添加油において, 摩擦係数がもっとも小さい値を示すときの表面形状を明らかにするために, FLN 添加油における摩擦係数と試験片の線粗さパラメータとの関係を調査した. その結果, 線粗さパラメータ R_{sk} , $R_{\Delta q}$, Mr_2 , R_{sm} , R_{ku} と FLN 添加油における摩擦係数は, 下に凸の二次関数で近似ができ, 決定係数はいずれも 0.5 以上であった. 一例として, R_{sk} と FLN 添加油における摩擦係数のグラフを Fig. 3 に示す. これらの近似式について, 摩擦係数の最小値およびそのときの各粗さパラメータの値を求めることで FLN 添加油における表面粗さ最適解を得ることができる.

4.2 SEM/EDX による観察

Figure 2 より, 最も低摩擦を発現した試験片 O について, 卓上走査電子顕微鏡およびエネルギー分散型 X 線分析装置により取得した二次電子画像, 炭素 C の元素マッピング画像を Fig. 4 に示す. FLN 添加油における摩耗痕では, 基油に比べて炭素 C の検出量が多いことは明らかであり, 低摩擦を発現していない試験片と比較してもより顕著であった. 従って, FLN 添加油中に存在するとされている, FLN を核として周囲に油をまとった「カエルの卵」状構造体⁽³⁾⁽⁴⁾が表面凹部およびしゅう動界面に介在し, 垂直荷重を支持することで基油に対して低摩擦を発現したと考えられる.

5. 結言

- 1) 線粗さパラメータ R_{sk} , $R_{\Delta q}$, Mr_2 , R_{sm} , R_{ku} は, FLN 添加油における摩擦係数との関係を決定係数 0.5 以上で下に凸の二次関数で近似でき, 摩擦係数の最小値およびそのときの粗さパラメータを求めることで表面粗さ最適解を得た.
- 2) 複数の FLN 構造体がプラトー構造表面における表面凹部にとどまりしゅう動界面に介在し, 垂直荷重を支持することで基油に対して低摩擦を発現した.

謝辞

本研究を遂行するにあたり, 株式会社レゾナック・ホールディングスよりフラーレン添加油を提供していただいた. ここに記し, 感謝の意を表する.

文献

- 1) A. Raina & A. Anand : Influence of surface roughness and nanoparticles concentration on the friction and wear characteristics of PAO base oil, Mater. Res. Express, 5 (2018) 095018.
- 2) 森: フラーレン添加油のトライボロジー特性に及ぼす表面形状の影響, 福井大学 学位論文 [修士 (工学)], (2022).
- 3) 近藤・門田・安部・今村: 潤滑油中のフラーレンの特異な凝集体と解析 (第 3 報), トライボロジー会議 2020 秋 別府, 予稿集 (2020) 42-43.
- 4) 八木・平山・佐藤・森・本田: バルクと界面を切り分けたフラーレン添加油中におけるナノ凝集体の観察, トライボロジー会議 2022 春 東京, 予稿集 (2022) 54-55.

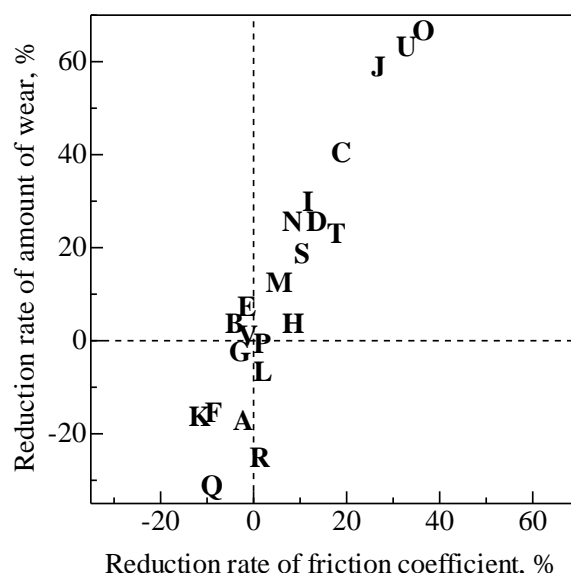


Fig. 2 Reduction rate of friction coefficient and wear volume of ball specimen

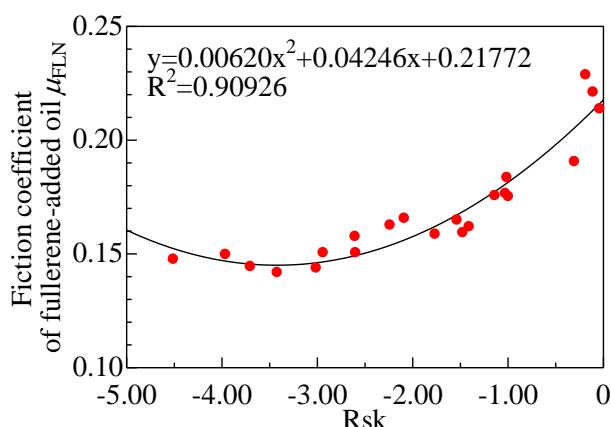


Fig. 3 Relation between R_{sk} and friction coefficient in FLN-added oil

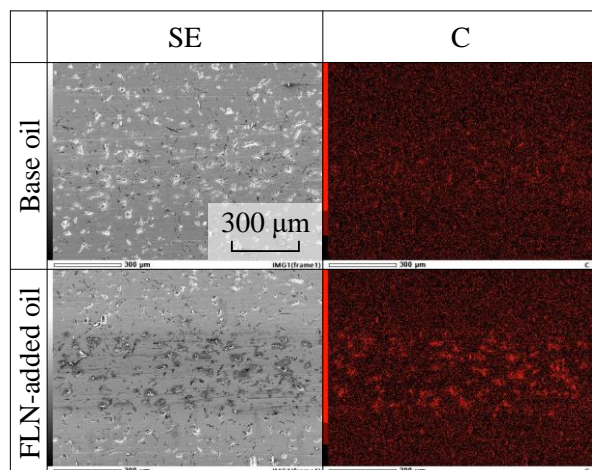


Fig. 4 SE images and EDX mapping of the specimen O