

境界/混合潤滑におけるフラーレン添加油の低摩擦発現機構

Friction reduction mechanism of fullerene-containing oil under boundary/mixed lubrication

福井大学（正）*本田 知己 福井大学（学）*森 郁賢 福井大学（学）*高崎 大暉 福井大学（正）*今 智彦

京都大学（学）**八木 渉

Tomomi Honda*, Fumitaka Mori*, Daiki Takasaki*, Tomohiko Kon*, **Yataru Yagi

*University of Fukui, **Kyoto University

1. はじめに

低粘度油の使用に伴う油膜形成能力の低下や、固体接触による摩擦係数の上昇の対策のため、耐摩耗剤や極圧剤が潤滑油添加剤として用いられている。しかし、これらの添加剤は温度依存性を有することや、硫黄やリンを含有することによる人体への悪影響が懸念されており、それらの代替となる新たな添加剤の開発が要求されている。

著者らは、ナノ粒子の1つであるフラーレン（以下 FLN）が、鏡面加工($Ra=0.01$)を施した試験片の組み合わせにおける潤滑下での摩擦において低摩擦が発現することを見いだしている¹⁾。先行研究ではナノ粒子添加剤は様々な因子によってその特性が左右されると言われており、特に表面粗さとナノ粒子のサイズとの対象の関係によってトライボロジー特性が変化することが報告されている²⁾。著者らは SAXS を用いて低極性油中に FLN 粒子が ~ 10 nm サイズで存在することを確認しており³⁾、このサイズは鏡面加工を施した表面粗さと同等な値であった。したがって、試験片の表面粗さを変更した際に FLN 添加油においてもトライボロジー特性が変化する可能性がある。

本研究では、表面粗さを変更した試験片に対して FLN 添加油を用いてトライボロジー特性を調べることで、表面粗さが FLN 添加油の潤滑機構に及ぼす影響を解明することを目的とした。その結果に基づいて、境界/混合潤滑におけるフラーレン添加油の低摩擦発現機構について考察した。

2. 試験方法および供試材料

2. 1 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の概略を Fig. 1 に示す。本試験機は一定速度で左右に往復運動するステージにプレート試験片を固定し、相手材となるボール試験片を押付けて往復すべり摩擦させる方式である。押付け荷重はアーム状のロードセル上部に分銅を載せることで加えた。摩擦力はアーム状のロードセルにより検出され、動ひずみ計と A/D 変換器を介して PC に取り込まれ、摩擦係数は摩擦力を荷重で除した値として算出された。

試験条件を Table 1 に示す。湿度による影響を小さくするため室温において相対湿度 50 %未満の条件下で試験を行った。試験条件は本試験で用いた試験片においてすべて境界潤滑状態となるようすべり速度および荷重を設定した。

2. 2 供試材料

本試験では、表面粗さの影響を調べるために、大きさ 30 mm×60 mm、厚さ 3 mm の SUJ2 軸受鋼のプレート試験片を用いて表面粗さの異なる試験片を作製した。ボール試験片には直径 10 mm（28 等級）の SUJ2 軸受鋼球を用いた。また、炭化水素系合成油である PAO4(動粘度 33.3 mm²/s 20 °C、粘度指数 123)にミックス FLN 粒子を 1000 ppm の割合で添加した試料油を用いた。

FLN 添加油により低摩擦を発現する条件として、①アブレシブ摩耗が少ないこと、②みかけの接触面積が大きいことがあげられる。この条件を確認するために、ブラスト加工により方向性のない任意の表面粗さに仕上げた後に 2 種類の研磨紙を用いて凸部を除去した。その後、アルミナ懸濁液 ($\phi 2.5 \mu\text{m}$) を用いてパフによる研磨を実施し平坦部の粗さを統一したプラトー形状を有する試験片を作製した。試験片の断面曲線を Fig.2 に示す。p1500 の研磨紙を用いて作製した試験片を $Ra=1.34, 0.89, 0.49, 0.48, 0.27, 0.12, 0.03 \mu\text{m}$ の順に A1, B1, C1, D1, E1, F1, G1 とし、p320 の研磨紙を用いて作製した試験片を $Ra=1.07, 0.92, 0.39, 0.18, 0.14, 0.09, 0.02 \mu\text{m}$ の順に A2, B2, C2, D2, E2, F2, G2 とした。

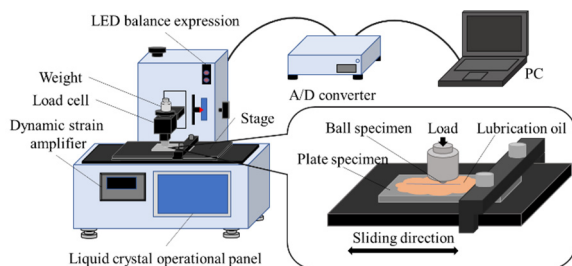


Fig. 1 Schematic view of the reciprocating tribometer

Table 1 Test condition

Test temperature, °C	20±3
Relative humidity, %RH	< 50
Sliding velocity, mm/min	2400
Stroke, mm	20
No. of cycles	1000
Load, N (MPa)	1.0 (~464)

3. 試験結果および考察

3. 1 試験結果

本試験では FLN 添加油によってトライボロジー特性が①悪化したもの、②微かに改善されたもの、③往復回数進行につれ改善されたもの、④大きく改善されたものの 4 タイプに分かれたため、その代表例として試験片 A1, C1, A2, C2 の往復回数ごとの平均摩擦係数の変化とその摩耗観察画像をそれぞれ Fig.3, 4 に示す。①の試験片 A1 の場合、無添加油よりも FLN 添加油の方が高い摩擦係数で推移しており、無添加油よりも摩耗幅が大きかった。摩耗面の表面画像から、FLN 添加油の方がより多くアブレシブ耗が生じているのがわかる。②の試験片 C1 では、どちらも摩擦開始時に摩擦係数が減少しその後安定した。FLN 添加油では摩耗面はより表面の粗い試験片 A1 よりも摩耗幅が大きく、無添加油よりも大きな摩耗こんを形成した。またその摩耗こんでは、無添加油および FLN 添加油ともにアブレシブ摩耗が生じている様子が確認される。③の試験片 A2 の場合、無添加油では 200 往復までの間に摩擦係数の立ち上がり確認され、その後摩擦係数は上昇するといった摩擦係数の推移を示したのに対し、FLN 添加油では一定の値で摩擦係数が推移した。④の試験片 C2 の場合、無添加油では摩擦係数は単調に増加したのに対し、FLN 添加油では③の試験片 A2 と同様に摩擦係数が一定の値で推移した。摩耗こんの状態は、FLN 添加油の場合には試験片 A2, C2 で共通しており、ボール試験片表面に黒色の膜が形成されている。無添加油の場合には、試験片 A2 では褐色および黒色の生成物が混在した酸化物が形成されており、試験片 C2 では表面に形成した酸化膜が線状に削れた摩耗こんを形成した。摩耗こん幅は、試験片 A2, C2 ともに FLN 添加油の方が小さかった。

3. 2 考察

表面粗さを変更させた試験ではアブレシブ摩耗が生じていた試験片 A1, C1 を除くと、緩やかに増加しているように見え、 R_a が同程度の表面においても、プラトー構造表面の方が摩擦係数や摩耗幅が小さくなっている。よって、FLN 添加油を用いる際にプラトー構造表面を施すことは有用であると考えられる。また、プラトー構造表面において FLN 添加油は安定した摩擦係数を示すのに対し、無添加油では鏡面に近づくにつれて定常摩擦係数が増加した。この定常摩擦係数の増加は、プラトー構造表面の中でも p320 で研磨されたものに多い。これは、p1500 で研磨した表面よりもみかけの接触面積が大きいものであり、2 面間の固体接触が顕著に生じていたのではないかと推察する。また、本試験では FLN 添加油の場合、ボール試験片表面に黒色生成物の膜が形成されていることが多く確認された。また、この膜が生成されている表面粗さの範囲が、先行研究⁴⁾にて報告されているサブマイクロスケールの FLN 凝集体未満であることから、この黒色生成物 FLN 凝集体との反応によって生成したものと推察する。FLN はラジカルトラップ作用を有することから、酸素と反応した FLN 粒子が摩擦面に存在し、この FLN 粒子と摩擦表

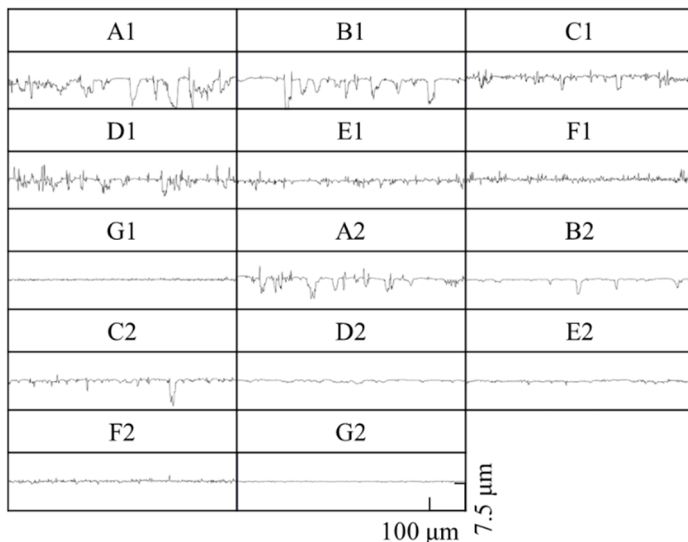


Fig. 2 Profile of polished plate surface

Table 2 Arithmetic mean roughness R_a of plate specimens

R_a , μm	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1
	1.34	0.89	0.49	0.48	0.27	0.12	0.03
	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2
	1.07	0.92	0.39	0.18	0.14	0.09	0.02

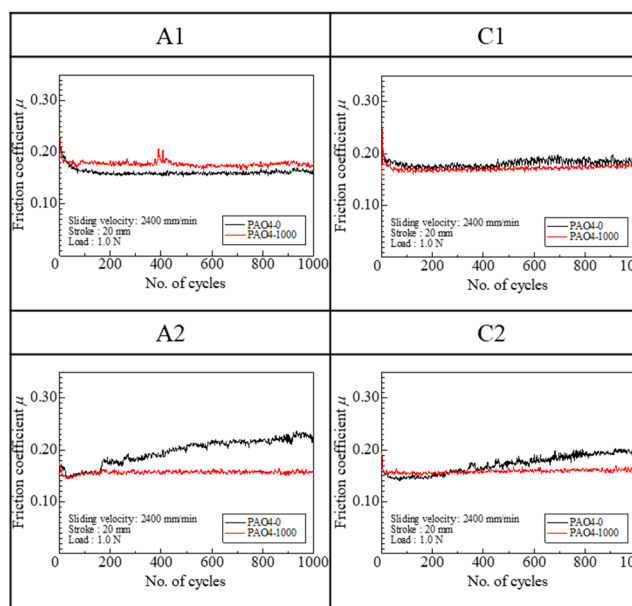


Fig.3 Variation of friction coefficient as a function of no. of cycles

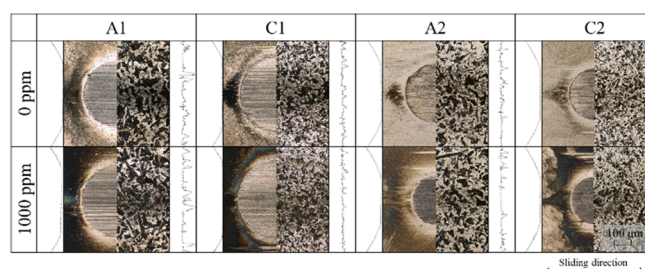


Fig.4 Laser microscope images of the worn surface
(left : ball, right : plate)

面の相互作用により摩耗面への酸化物の生成を促進したと推察する．当然のことながら，表面粗さの平均的な大きさを表す Ra で評価するだけでは FLN 添加油の低摩擦作用条件を切り分けることはできず，他の表面性状パラメータや，複合パラメータを用いる必要があると考えた．そこで，負荷曲線におけるコア部の高さを示す Rk ，水平方向の大きさを示す RSm の値を用いて 3 次元表示した結果を Fig.5 に示す．Fig.5 では，無添加油と FLN 添加油の定常摩擦係数，しゅう動方向および直角方向の摩耗こん幅の変化量を式(1)で与える百分率で表し，この割合がすべて 15 % 以上減少したものを青(Type1)で，すべて 5 % 以上減少したものを水色(Type2)で，1 つでも 5 % 以上減少したものを緑(Type3)で，1 つでも 5 % 以上増加したものを黄色(Type4)で，すべて 5 % 以内のものを赤色(Type5)で表している． $Rk = 1.3 \mu\text{m}$ を境に FLN 添加油の低摩擦性が変化することがわかる．また，ある Rsm の値から FLN 添加油の低摩擦が顕著になることがわかる．このように FLN 添加油の低摩擦性は，単に表面粗さの高さ方向の大きさが関係しているだけではなく，表面粗さの水平方向の大きさ RSm が大きい必要があることがわかった．

$$\text{トライボロジー特性の低減割合} [\%] = \left(1 - \frac{\text{FLN添加油の測定データ}}{\text{無添加油の測定データ}} \right) \times 100 \quad (1)$$

3. 3 FLN 添加油の低摩擦発現機構

以上の結果から，FLN 添加油の低摩擦発現機構を考察した結果を Fig.6 に示す．Fig.6(a)の様にしゅう動時に荷重を支える領域である Rk が FLN 凝集体サイズより大きい表面では，アプレシブ摩耗が生じる際に凹部の領域が狭小化し，圧縮される．このとき FLN 凝集体が油中に存在することで，FLN 粒子が反発し合い，荷重が分散される．一方で，Fig.6(b)の様に FLN 凝集体よりも Rk の値が小さい場合には，しゅう動に伴い FLN 凝集体が 2 面間に掻き込まれやすくなる．また，この場合においても凹部に閉じ込められた FLN が荷重を分散する．プラトー表面においても同様なことが生じると考えられ，Fig.6(c)の様に凹部には FLN 凝集体が存在し，また Rsm の値が大きいときに，プラトー部においても一次粒子にまでほぐされた凝集体が存在することで油膜が確保される．この二つの作用が複合することで，プラトー表面において FLN 添加油の低摩擦性が発現すると推察される．

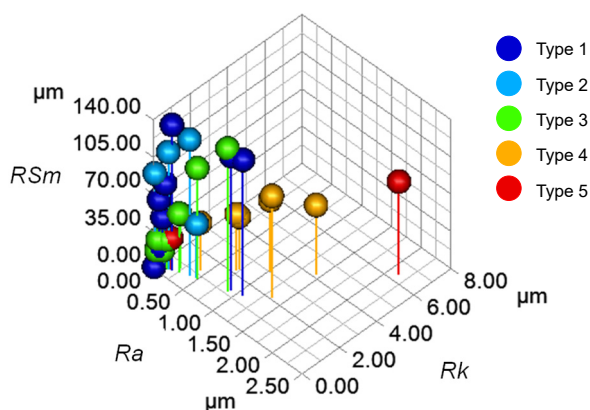


Fig.5 Correlation between Ra , Rk and RSm

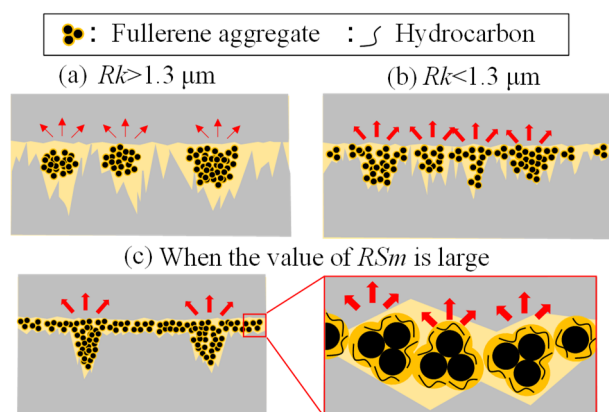


Fig.6 Lubrication model of FLN added oil

4. 結言

表面形状が FLN 添加油のトライボロジー特性へ及ぼす影響を明らかにするため，表面形状の異なる試験片を作製し，往復動摩擦摩耗試験を行った結果，以下の結論を得た．

- (1) プラトー構造表面を持つ試験片では，FLN 添加油は Rk の値が凝集体サイズ未満の場合に低摩擦が発現しはじめ， Rsm の値が大きいほど低摩擦特性が顕著になる傾向がある．
- (2) アプレシブ摩耗が顕著な摩擦ペアでは，FLN 添加油を用いても低摩擦特性を示さないが，FLN の添加によってプレート試験片の摩耗が抑制されていた．

文献

- 1) 森郁賢，本田知己：貧潤滑下におけるフラーレン添加油の低摩擦発現機構，2021 年度日本機械学会年次大会，S116-13 (2021)
- 2) Yujin.H et.al：Effect of the size and morphology of particles dispersed in nano-oil on friction performance between rotating discs, Mechanical Science and Technology, 25, 11 (2011) 2853-2857.
- 3) 八木渉 他 4 名：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 東京 春，予稿集 (2022) 54-55.
- 4) 今村貴子：潤滑油へのナノカーボン材配合の効果，月刊トライボロジー，2022.12 (2022) 28-32.

謝辞

本研究を遂行するにあたり，株式会社レゾナック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．