

## 炭素系ナノ粒子分散潤滑油による摩擦低減メカニズム解析

## Analysis of Friction Reduction Mechanism by Carbon-based Nanoparticle Dispersed Lubricants

宇大（学）\*岩下悠至 宇大（正）馬淵豊 宇大（正）鈴木 昇 日産アーク（正）荒木 祥和

Yushi Iwashita\*, Yutaka Mabuchi\*, Noboru Suzuki\*, Sawa Araki\*\*

\* Utsunomiya University, \*\* Nissan ARC, LTD.

## 1. 背景

自動車用エンジンの摩擦低減に Diamond like carbon 膜 (DLC) の適用が進んでいる。一方、フラーレン (FLN) は、DLC 膜と同様に炭素からなる同素体で、C<sub>60</sub> の 1 次粒子径は 0.71nm と小さいが、常温では C<sub>60</sub> を 1 つの格子として配置した、面心立方および六方細密の混合したクラスタ構造を取るため<sup>1)</sup>、これよりはるかに大きな粒子サイズとなる。FLN を潤滑油に分散した系での摩擦低減の報告が多数なされているが、その低摩擦化機構は明確になっていない。

著者らは Fig.1 に示す FLN の低摩擦化機構として、表層の sp<sup>2</sup> 構造中の 2 重結合が飽和し溶媒由来の -OH 基が結合し、更に溶媒の極性基との間での水素結合により低せん断層を形成し、摺動部に巻き込むこまれることで低摩擦化を実現すると考えている<sup>2)</sup>。このため、この低摩擦化機構を実現するためには、潤滑油に FLN に加え、-OH 基の供給源となる油性剤が、必要不可欠と考えている。

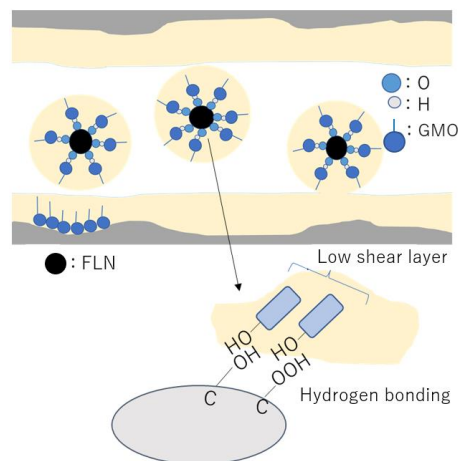


Fig.1 Low-friction mechanism model.

## 2. 目的

基油に異なる量の FLN および油性剤 GMO を添加し、それぞれの摩擦係数に及ぼす影響を明らかにする。解析にあたり、試験後の合成表面粗さを用いて整理を行い、低摩擦化機構の考察を行う。

## 3. 試験方法

基油ポリアルファオレフィン (PAO4) に粉末状態のフラーレン (FLN, C<sub>60</sub>/C<sub>70</sub>) を 0.01~1.0wt%, 分散剤兼摩擦調整剤として油性剤グリセリンモノオレート (GMO) を 0.1wt%, 0.3wt%, 1wt% を添加し、それぞれ 20 分間の超音波処理で分散を行った。各試験油の仕様を Table.1 に示す。摩擦特性の評価は Ring/Disk 型の試験で行い、Disk 試験片に SCM440, HRC48-50, Φ31.1×2.4mm, Ra0.05-0.08μm を用い、Ring 試験片に S45C, Φ30×Φ20×24.5mm, HRC45 とし、Disk と接する端面の粗さが Ra0.3μm となる仕様を用いた。試験条件は回転数 60rpm (0.08m/s), 油温 80℃, 荷重 25kgf (投影面圧 0.624MPa), 試験時間を 240 分とした。試験後、レーザー顕微鏡を用いてそれぞれの摺動部の表面粗さ Rq を計測し、合成粗さ Rrms ( $=\sqrt{(Rq_{disk}^2 + Rq_{ring}^2)}$ ) を算出して摩擦係数の解析に用いた。

Table.1 Test oil specifications

		GMO / wt%			
		0.0	0.1	0.3	1.0
FLN / wt%	0.00	Oil J	Oil K	Oil L	Oil M
	0.01				Oil E
	0.05				Oil F
	0.10		Oil A	Oil C	Oil G
	0.50				Oil H
	1.00		Oil B	Oil D	Oil I

## 4. 結果及び考察

Fig.2 に摩擦試験結果を示す。いずれの FLN+GMO の組合せにおいても何も含まない PAO に対し、摩擦係数は大幅に減少した。但し、GMO 単独でも摩擦係数は大きく低下し、GMO 1wt% では FLN+GMO の低下分の約 8 割を占めるに至った。GMO 1wt% 添加では、FLN 添加の寄与が小さいが、GMO の添加量が少ないほど FLN 添加による摩擦低減効果が認められた。

GMO と FLN の摩擦影響の解析として、摩擦係数の値に近い Oil B (GMO 0.1wt% FLN 1.0wt%) と Oil E (GMO 1.0wt% FLN 0.01wt%) の油中の FLN の 2 次粒子径を測定し比較し、その結果、GMO が多い Oil B では 870nm と小さかったのに対し、GMO の少ない Oil E では 1490nm であった。このことから、Fig.3 に示すように、GMO の多い場合、FLN の 2 次粒

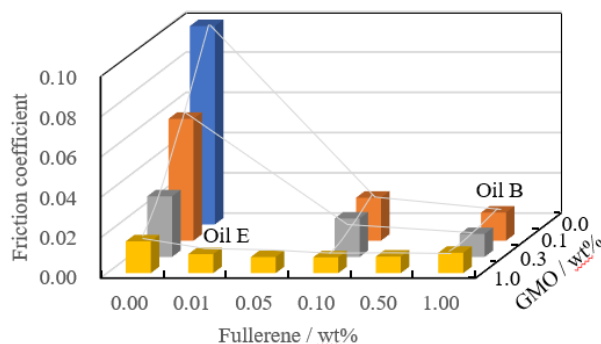


Fig.2 Relationship between the Fullerene addition added and the Friction coefficient.

子径が小さく、低せん断層の総表面積が増大し、かつ GMO 自体の金属表面への吸着も期待される。一方、GMO が少ない場合、FLN の 2 次粒子径が増大し、Oil E と同レベルの低せん断層の総表面積を得るためにはより多くの FLN の添加が必要と考えられる。

次に試験後の合成表面粗さを算出し、摩擦係数との関係を Fig.4 に示す。GMO 0.1wt% と 0.3wt% では、フラーレンの添加量が増すにつれ、合成表面粗さの減少と、それに伴う摩擦係数の減少傾向が認められた。一方、GMO1% では、更なる合成粗さの低下を示す一方で、摩擦係数に対する感度は低い傾向を示した。GMO の添加量が多い場合、金属側への吸着も進み、表面粗さに対する感度を抑制している可能性が考えられる<sup>3)</sup>。

本試験は面接触での試験のため油膜厚さの算出ができない。そこで潤滑状態の指標である  $\Lambda$  ratio の代用指標として、合成表面粗さの逆数を用いた。合成表面粗さの逆数により摩擦係数を整理した結果を Fig.5 に示す。逆数の値が大きい、即ち平坦面同士の摺動となる、潤滑状態が良好なほど低摩擦化する傾向が認められた。また、GMO 添加量が 1% の場合、より低摩擦化する傾向を確認した。Fig.6 に示すストライバック線図において、流体潤滑域から混合潤滑域に移る際の摩擦係数の立ち上がり部が、より境界側に拡大したためと考えられる。

## 5. まとめ

摩擦調整剤 GMO 及びフラーレンの添加量を変えた摩擦試験より以下の知見を得た。

(1) GMO の添加量が少ないほど、フラーレンの添加に伴う摩擦低減の感度は増した。

(2) GMO0.1wt% と 0.3wt% では、フラーレン添加による合成粗さの減少と摩擦係数の減少が認められたが、GMO1% では合成粗さの摩擦係数の感度が低い傾向を示した。

(3) 合成粗さの逆数 ( $\propto$  潤滑状態) により整理した結果、潤滑状態が良好なほどフラーレン添加による低摩擦化効果が増大する。GMO 添加量が 1wt% の場合、低摩擦化領域がより境界側に拡大する傾向が認められた。

## 6. 参考文献

- 1) 丸山茂夫, NEW DIAMOND, 8, 1, p32-38.
- 2) レンツまりの, 他, トライボロジー会議 2022 春 東京, 予稿集 F15, p324-325.
- 3) Febin Cyriac et al. Tribology International 157 (2021) 106896.

High content of GMO causes smaller 2<sup>nd</sup> particle of FLN and thick adsorbed film on steel..

Low content of GMO causes larger 2<sup>nd</sup> particle of FLN.

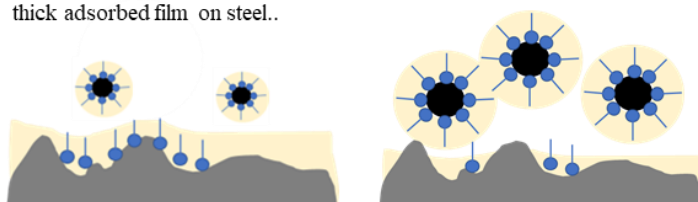


Fig.3 Model for low friction by combining FLN and GMO

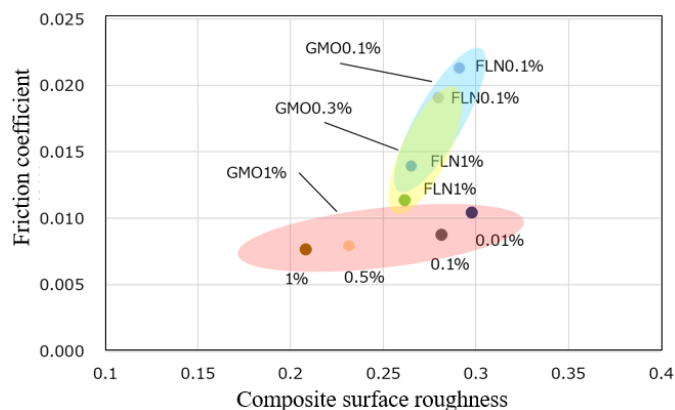


Fig.4 Relationship between composite roughness and friction coefficient.

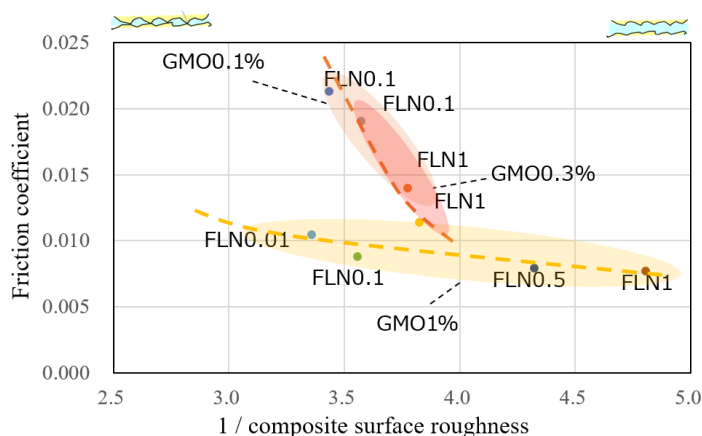


Fig.5 Relationship between Inverse of composite roughness and friction coefficient.

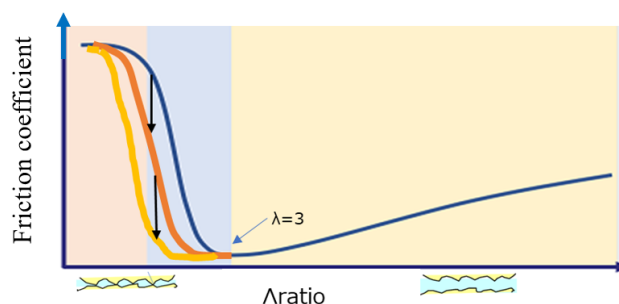


Fig.6 Relationship between friction coefficient and  $\Lambda$  ratio.