

【論文】

カム・フォロワ摩擦摩耗に及ぼすFM剤補充・劣化エンジン油へのすす混入の影響

副島 光洋 * 長藤 将史 **

Influences of Soot Contamination in Semi-used Oil Supplemented with FM Agent on Friction and Wear for Cam and Follower

Mitsuhiro Soejima Masashi Nagafuji

Abstract: As reported in the previous studies on the friction characteristics for the cam and slipper follower, the effect of the anti-wear and friction modifier additives, ZnDTP and MoDTC, additionally blended as a kind of the supplementary FM agent to semi-used engine oils on the reduction of friction was made obvious through the experiment to measure the friction with the cam follower test rig, where the influence of soot contamination in oil on the friction was examined by mixing the carbon black substituted for the engine soot. In the present study, the experiment to examine the friction and wear characteristics was conducted under the condition of comparatively long test duration with the same test rig and test oils. Key study results are summarized as follows. (1) Both the supplement of the FM agent to the semi-used engine oil and the increase of the supplement amount seemed to be effective to reduce the friction and wear. (2) When mixed with the carbon black more than 1.0 in mass percentage, however, the effect for the wear becomes remarkably low while the effect for the friction is scarcely kept obvious. (3) The coagulation of soot in oil should be controlled by the dispersant, and the allowable rate of soot content in oil is less than 1.0 in mass percentage.

Keywords: Tribology, Friction, Wear, Valve Train, Cam, Slipper Follower, Lubricating Oil, Friction Modifier, Additive Deterioration, Soot Contamination

1. はじめに

地球の温暖化による自然災害の発生を防ぐために、今日もっとも普及した内燃機関に対して、エネルギー消費の削減や資源の節約につながる技術の導入が望まれている。機関の熱効率向上だけでなく内部の摩擦による動力損失の少ない機械効率の高い状態にすることすなわち燃費の一層の改善が急務である。

また、エンジン油の劣化とりわけ排気ガスの NOx 低減のための EGR によるすす混入などが原因の摩擦摩耗増大を防ぎ、要素部品やオイルの信頼性を高めて長寿命化することなども重要である^{(1) - (5)}。

これらの課題に対して、既報^{(6) - (20)}で述べたように、低摩擦・表面処理、耐摩耗・耐スカuffリング材料、低粘度エンジン油、オイル添加剤など、種々のトライボロジー技術が開発され応用されてきた。

動弁系カム・フォロワに関するトライボロジー技術としては、その高速・高面圧の接触条件に対し、硬質・表面改質カム・フォロワ材の利用、弁リフタ直打方式やローラフォロワ方式の適用、エンジン油のマルチグレード低粘度化における HTHS 粘度の確保と摩擦調整剤 (FM) の開発、その酸化劣化・すす汚損に伴う摩擦摩耗増大のメカニズムの解明や防止効果に優れた分散剤の開発などがある。

既に、本報と同様なカム・スリッパフォロワ試験機を用いて測定した実験から、エンジン油すす混入がカ

* 工学部機械工学科

** 大学院工学研究科機械工学専攻

ム・フォロワの摩擦摩耗に及ぼす影響として、摩擦の不安定性と時間的増大の傾向、アブレシブ摩耗の増大、オイル添加剤 ZnDTP の摩擦防止効力の低下、またオイル添加剤 ZnDTP と MoDTC の共存による摩擦摩耗低減効果などについて把握された^{(16) - (20)}。

そして、実働機関の運転時間スケールの変化として、エンジン油が新しい初期は、添加剤などのトライボ化学反応膜形成作用で接触面がなじみ、摩擦は漸減するが、時間の経過と共に、エンジン油が酸化劣化し添加剤の効力は衰え、すす混入量も増し、摩擦と摩耗が漸増する状態に転ずるものと考察された^{(21) (22)}。

そこで、機関の運転により劣化が進み添加剤の効力が薄れたエンジン油に一種の FM 剤として補充的に ZnDTP や MoDTC を添加すれば、摩擦摩耗の増大を防ぎ、低減させる効果を期待できると考え、実験的に確かめることにした。さらに、エンジン油へのすすの混入など劣化汚損の進行に伴う摩擦摩耗低減効果の変化についても調べることにした。既に、実験で調べた摩擦に及ぼす影響の一部分については報告した^{(23) (24)}。

本研究では、既報⁽²³⁾と同じ試験機、測定方法ならび試験オイル調合方法で、カム・フォロワの摩擦と摩耗の両方に及ぼす影響について調べ、添加の有効性、問題点などを検討したので、その概要を報告する。

2. 実験方法

2.1. 摩擦や摩耗の測定方法

実験は、既報⁽²³⁾で示したカム・スリッパフォロワ摩擦試験装置すなわちカム試験片にスリッパフォロワ試験片を接触させ、弁スプリング仕組みで荷重をかけ、カム軸の回転に伴う両試験片の間の摩擦力の変動をロード・センサーで測る試験機で実施した。

摩擦のみを測る実験は、既報⁽²³⁾の場合と同じように、複数の供試オイルについて、同一のカム・フォロワ試験片組合せでオイルのみを交換する要領で行い、試験片の個体差による測定値のバラツキを避けた。オイル交換後の摩擦の時間的な変化が収まりオイルに固有な摩擦の大きさに達することを条件とした。すなわち、表面の粗さやトライボ化学反応膜など、オイル交換前のカム・フォロワ試験片の表面状態の履歴が無くなり、新たな馴染み完了の状態となりオイルに固有な摩擦であることを確認できるまで、各オイルで最短約 7 時間の実験、また状況に合わせ最長約 15 時間の実験を行った。

一方、摩擦と摩耗の両方に及ぼす影響を調べるために、いくつかの供試オイルについて、最長 150 時間までの摩擦摩耗実験を行った。いずれの実験も、カム軸回転速度 800rpm、最大カム・フォロワ接触荷重 930N、オイル温度 120°C の一定条件で実施した。

カムの材質は、既報と同じ高周波焼入れ球状黒鉛鋳鉄（ビッカース硬さ 6.9 GPa）であり、フォロワの材質は、チル鋳鉄（ビッカース硬さ 7.9 GPa）である。

図 1 は、摩擦摩耗実験における接触荷重、摩擦力ならびに摩擦係数のカム角度変化の測定例であり、図中の点線は実験の初期、実線は実験開始 75 時間後ないし 150 時間後の摩擦波形をそれぞれ表している。摩擦は、摩擦係数のカム角度変動のカム・フォロワ接触時間当り平均の値ならびにその経時的な変化で評価し、また摩耗量は、実験の前と開始 50 時間後、100 時間後および 150 時間後に行ったカム・ノーズ方向外径やフォロワ面プロフィールのマイクロメータや表面粗さ計による測定で得た外径やプロフィールの変化から求めた。

2.2. 供試オイルの調合と性状

実験に供試したオイルは、その調合と性状を表 1 と表 2 に示すような実働機関の 300 時間相当の運転で得られたドレン油すなわちエンジン使用油 S-1、それに FM 剤を重量割合で 6% 添加した S-2、11% 添加した S-3 の 3 種類と、それらにカーボンブラックを重量割合で 0.5% 混合した S-10、1% 混合した S-4、S-8 および S-9、2.5% 混合した S-5 あるいは 5% 混合した S-6 と S-7 の 7 種類の合計 10 種類である。

カーボンブラック混合オイルには、サクシイミド分散剤を重量割合で 3% ~ 10% 添加し、ホモジナイザーで分散処理を施した。使用したカーボンブラックの一次粒径は約 23nm である。

図 2 と後述の図 6 に、供試オイル S-6、S-7、S-8、S-9 ならびに S-10 の混合カーボンブラックの粒径分布を示す。図のように、オイル S-6、S-8 および S-10 では、粒径分布の中央値が 0.2 μm ~ 0.4 μm の大きさであり、エンジン使用油 SAE30 のすす粒径分布の中央値と

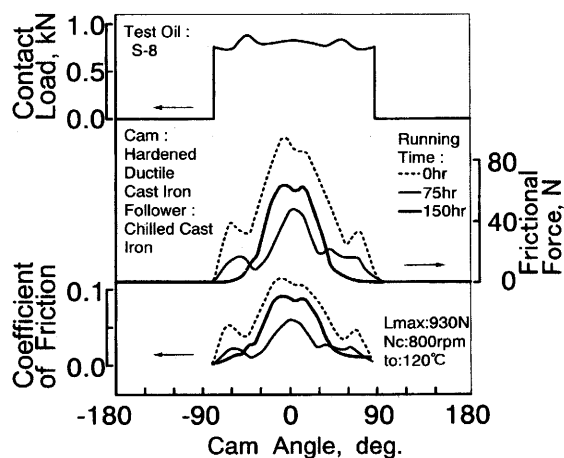


Fig.1 Change of contact load, friction force and friction coefficient with cam angle

ほぼ同じである。しかし、オイルS-7とS-9は、分布に小径と大径の2つの異なる粒径でピークが現れ、粒径の大きいカーボンブラックと粒径の小さいカーボンブラックが混在する状態になっている。とくに、S-9の分布は粒径の大きい方に偏っている。これは、供試オイル調合の分散剤量が少ないなど、カーボンブラック粒子の油中分散が十分でないことを表している。

Table 1 Property of test oils

Test Oil	S-1	S-3	S-6	S-7	S-8	
Rate of Used Oil (mass %)	100	89	89	100	100	
Rate of Added Additives (mass %)	0	11	11	0	0	
Type of Additives	-	Friction Modifier		-	-	
Kinematic Viscosity (mm ² /s)	40deg	63.2	77.72	115	69.76	61.7
	100deg	9.60	12.08	17.28	10.92	9.40
Viscosity Index	133	152	169	152	133	
Total Acid Number (mgKOH/g)	2.90	3.98	3.53	2.70	3.09	
Total Base Number (mgKOH/g)	1.49	1.98	2.0	1.29	1.08	
Ultra Centrifugal Coagulated Heptane Insolubles (mass %)	0.92	0.54	4.70	5.10	1.72	
Coagulated Pentane Insolubles (mass %)	0.05	0.03	1.27	0.48	0.11	
Metal Content (ppm)	Ca	1830	1760	1905	1900	1690
	Zn	1100	1400	1350	1100	1000
	P	910	1200	1150	970	850
	Mo	100	500	465	99	47
	Fe	94	65	505	120	120
Soot Size (Median Value μm)	-	-	0.488	0.363	0.313	

Table 2 Quantitative combination of FM agent and carbon black in test oils

Test Oil	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5
Rate of Added Additives (mass%)	0	6	11	11	-
Rate of Mixed Carbon Black (mass%)	0	0	0	1	2.5
Test Oil	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10
Rate of Added Additives (mass%)	11	0	0	6	6
Rate of Mixed Carbon Black (mass%)	5	5	1	1	0.5

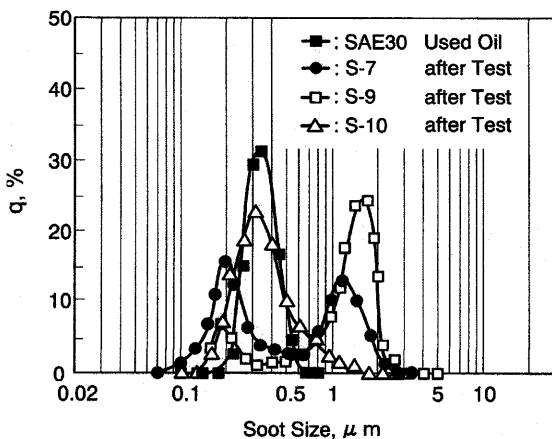


Fig.2 Distribution of soot size

3. 実験結果と考察

3.1. 摩擦に及ぼす影響

図3は、上述のFM剤の補充添加量とカーボンブラックの混合量が異なる供試オイルを用いて測定した平均摩擦係数(時間的な安定収れん値)の比較である。図から、エンジン使用油に対するFM剤補充添加やカーボンブラック混合がカム・フォロワ摩擦に及ぼす影響として、その一部については既報^(2,3)でも述べたように、以下のことが分かる。

まずカーボンブラックを混合していないオイルでは、FM剤を補充添加したS-2やS-3の方が、添加していないS-1よりも平均摩擦係数すなわち摩擦は小さく、S-2、S-3と添加量が増すほど摩擦は低くなり、FM剤の補充添加による摩擦低減の効果が認められる。これは、FM剤による摩擦面へのトライボ化学反応性の増大、つまり二硫化モリブデンのようなせん断抵抗の小さい反応膜の形成が促進され摩擦が低減されるためであろう。

ところが、FM剤を補充添加しないS-8のオイルの場合のように、重量割合1%ほどの少量のカーボンブラックを混合ただけで摩擦が大幅に小さくなることもある。これは、カーボンブラックの固体潤滑性の現れと見なせないこともないが、後述のような摩擦の不安定性や摩耗率の高さから推測すると、ソフトなアプレシブとして表面のポリッシングすなわち表面突起の摩耗が促進され固体接触の度合いが減少し摩擦が低下したものと考えられる。

さらに、カーボンブラック混合量が増すほど、摩擦は大きくなる傾向にある。これは、接触面間へのカーボンブラック粒子の介在度合いが増し、流入油のスターブが起り、油膜ならびにトライボ化学反応膜の形成が害され、油膜は薄くなり、固体接触と境界接触によ

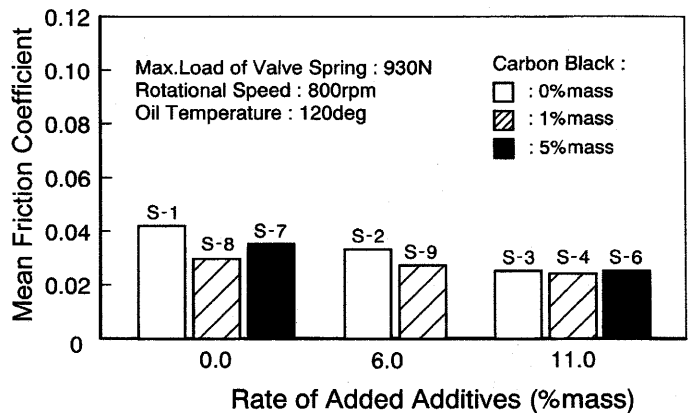


Fig.3 Comparison of mean friction coefficient among quantitative combinations of FM agent and carbon black in test oils

る高い摩擦となるためであろう⁽²²⁾。

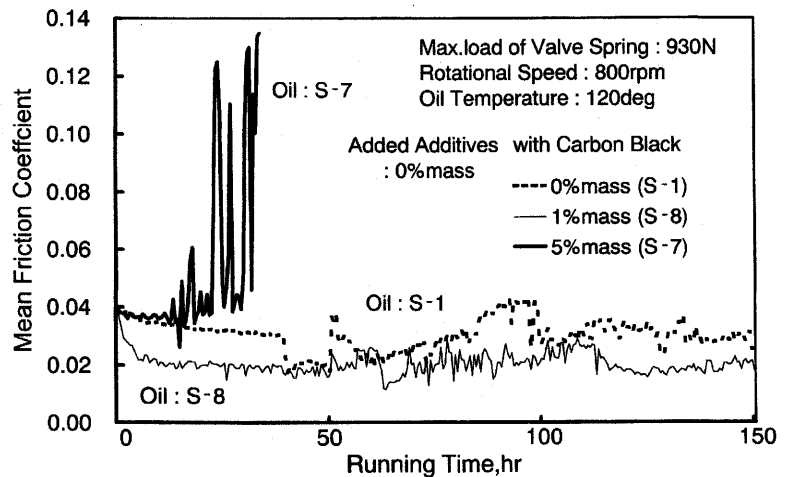
しかし FM 剤を補充添加した場合は、カーボンブラック混合に伴う摩擦の変化が小さい。すなわち、FM 剤添加量が少ないときにカーボンブラック混合の影響は大きく、FM 剤添加量が多くなるほど影響は小さくなる傾向にあり、重量割合で高々 5% ほどのエンジンすす混入量であれば、FM 剤の補充添加による摩擦低減の効果は現れると言える。

3.2. 摩耗に及ぼす影響

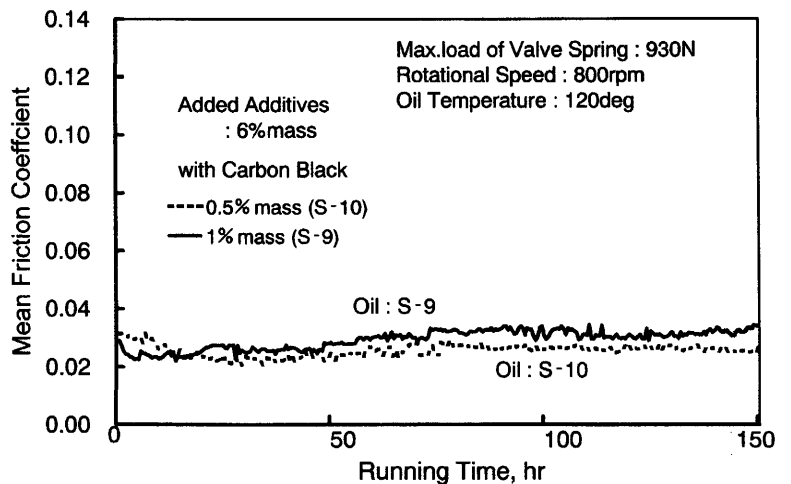
次に、最長 150 時間の比較的長い摩擦摩耗実験を行い、FM 剤補充添加とカーボンブラック混合がカム・フォロワ接触面の摩擦と摩耗に及ぼす影響を調べた。実験の途中、図 1 に例示したように、摩擦は時間的に変化する。平均摩擦係数の経時的な変化を図 4 に、カム・ノーズ方向とフォロワ面の摩耗率を図 5 に、それぞれ示す。供試オイルは (a) エンジン使用油 S-1、それにカーボンブラックを 1% 混合した S-8、5% 混合した S-7 の FM 剤を添加していない 3 つのオイル (b) エンジン使用油に FM 剤を 6% 添加しカーボンブラックを 0.5% 混合した S-10 または 1% 混合した S-9 の 2 つのオイルと (c) エンジン使用油に FM 剤を 11% 添加した S-3、それにカーボンブラックを 5% 混合した S-6 の 2 つのオイルである。

図 4 と図 5 から、エンジン使用油に FM 剤を補充添加したりカーボンブラックを混合したりした場合のカム・フォロワの摩擦摩耗とくに摩擦とその経時的な変化およびカム・ノーズやフォロワ面の摩耗率の変化の特徴ならびに摩擦摩耗低減の方策について、以下のことが分かる。

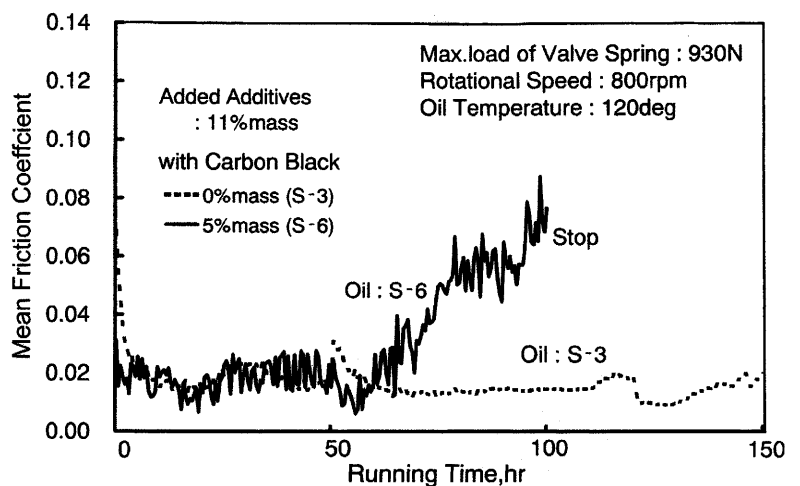
まず摩擦変化に関して、FM 剤を添加していないオイル (S-1, S-8, S-7) では、カーボンブラック混合量の多少すなわち摩擦の高低にかかわらず時間的な変動(不安定性)が目立ち、FM 剤を添加したオイルの中のカーボンブラック混合量が少ない S-10, S-9 および S-3 では、摩擦は低く、その変動も小さく安定している。しかし、FM 剤を多目に添加しカーボンブラックも多目に混合したオイル S-6 では、摩擦の変動が激しく、オイル S-7 と同様



(a) Supplementary added additives : 0 % mass



(b) Supplementary added additives : 6 % mass



(c) Supplementary added additives : 11% mass

Fig.4 Changes of mean friction coefficient with running time

に、実験の途中で摩擦が増大し異常に高くなり、実験の継続が不可能な状態となり、前節で指摘したカーボンブラック混合割合 5%は許容できない。さらに FM 剤添加 6%のとき、カーボンブラック混合が 1%のオイル S-9 は摩擦が時間的に漸増し、0.5%のオイル S-10 では漸減する。したがって、FM 剤を 11%と多目に補充添加した場合であっても、カーボンブラック混合の許容限度はおおよそ 1%と思われ、使用エンジン油すす混入の許容量はかなり小さくなる。

また摩耗に関して、エンジン油の新油（参照オイル A）や FM 剤を 11%添加したオイル S-3 の摩耗率が小さい場合に比べ、FM 剤を添加していないオイルの S-1 と S-8 の摩耗率は 1 オーダ高く、カーボンブラックを 5%混合したオイル S-7 では 2 オーダも高くなり、ヘプタン不溶解分を 7.7%も含み劣化が進んだエンジン使用油（参照オイル B）の場合を超えるほどの大きな摩耗率になる。また共にカーボンブラックを 5%混合したオイル S-7 と S-6 を比べると、オイル S-6の方が摩耗率は低く、FM 剤の添加で摩耗が減少することは認められる。しかし、オイル S-9 や S-10 のように、カーボンブラックを 1% ~ 0.5%と極僅か混合するだけで、オイル S-8 の場合と同等の摩耗率になる。したがって上述の摩擦の場合と同様に、カム・フォロワの摩耗率を低く抑えるには、使用エンジン油への FM 剤の補充添加量を多目にし、すす混入の制限量を 1%以下としなければならない。

3.3. 油中すす異物凝集の影響

図 6 は、オイル S-6 と S-8 について調べた混合カーボンブラックの粒径分布である。S-8 では、粒径分布の中央値が約 0.3 μm になり実験前と同じで、実験中にほとんど変化しなかったが、S-6 では、図示のように実験中カーボンブラック粒子が凝集し、粒径分布の中央値が 0.5 μm ~ 1 μm と実験前の粒径の 2 倍以上に大きくなった。

また、前出の図 2 に示したオイル S-9 と S-10 の場合、実験中の粒子凝集は僅かであり、S-8 の場合と同じように、粒径分布の大きな変化は現れなかった。これらのカーボンブラック粒径分布の分析結果と前出の表 1 に示したオイル性状の分析結果ならびに図 3 や図 5 の実験結果から、FM 剤を補充添加したエンジン使用油の性状とその経時的な変化とりわけ混入すす異物とその凝集がカム・フォロワの摩擦摩耗に及ぼす影響とその対策について、以下のことが考えられる。

まず、オイル S-3 と S-6 のような摩擦低減のために重量割合で 11%もの多量の FM 剤を補充添加した場合であっても、カーボンブラックすなわちすすの混入量が多くなるに従い、摩擦は不安定で時間の経過と共に漸増し摩耗が増大したことから、すすが凝集し大きな粒径となってカム・フォロワ接触面間に介在し、オイル流入量のスターブによる厚さの薄い油膜かつ境界・固体接触の増大、凝着摩耗とアプレシブ摩耗の増大、MoS₂ のようなせん断抵抗の小さいトライボ化学反応膜形成の阻害などが

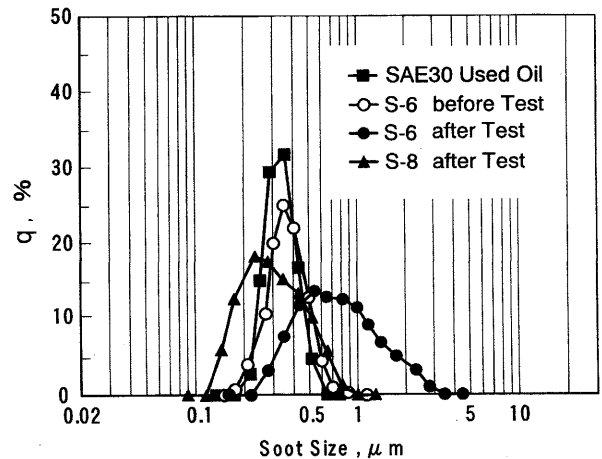


Fig.6 Changes in distribution of soot size

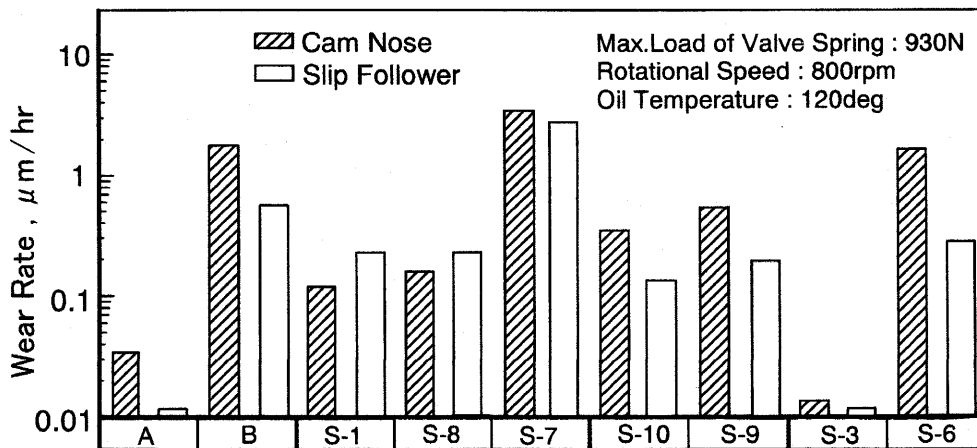


Fig.5 Comparison of wear rates of cam and follower among test oils

起こり摩擦も摩耗も増大する⁽²²⁾。

次に、オイル S-10 と S-9 のような 6% の FM 剤を添加し、カーボンブラックすなわちすすの混入量が 0.5%、1% と少ない場合、摩擦は S-9 で若干漸増の傾向にあったものの、比較的に低くなり時間的にも長く安定したこと、しかし摩耗率は両方ともやや高かったこと、オイル中の異物として S-10 は少量かつ小さなすす粒径であり S-9 は同じ少量でも S-10 の倍量で大きなすす粒径であったことなどから、上述のようなすすの混入量と凝集粒塊が摩擦摩耗の因子であるだけでなく、エンジン使用油の酸化劣化物（スラッジ）や不溶解分（すすや摩耗粉）が、僅かな量のすす混入の影響を受け、カム・フォロワ接触面間に介在するアブレシブとして作用し、摩耗を増大させる⁽²²⁾。

したがって、エンジン使用油への FM 剤補充添加の摩擦摩耗低減の効力を保ち長寿命化するには、FM 剤補充量だけでなくすすや摩耗粉などの不溶解分の混入量の許容限度にも配慮しなければならない。

今後、エンジン油ロングライフ化のための研究開発の一環として、粘度増大の防止、酸化劣化物（スラッジ）生成の防止、添加剤の効力低下防止、混入すす・摩耗粉など異物の除去（フィルター性能の改善、Long Life Engine Oil Filter の開発）、分散剤の性能向上によるすす・異物凝集の防止、耐摩耗性の改善（表面仕上げ加工、コーティング・表面改質、固体潤滑材の適用）などに取り組む必要がある。

4. 結 論

以上のように、劣化汚損が中程度に進行したエンジン使用油に摩擦調整・摩耗防止剤（FM 剤）を補充的に添加した場合のカム・フォロワ摩擦摩耗の低減効果、その添加量による効力の変化、すす代用のカーボンブラックの混合に伴う同効力の変化などを調べた結果、次のことが明らかになった。

- (1) FM 剤の補充添加ならびに添加量の増量は、摩擦摩耗の低減に効果がある。
- (2) 重量割合で 1% 以上のカーボンブラック混合量の場合、摩擦低減の効力は保たれるが、摩耗低減の効力は著しく低下する。
- (3) 混入すすの凝集すなわち粒径の増大を防ぐだけでなく、摩耗粉やスラッジなどの油中異物によるアブレシブ摩耗を発生させないように、すすの混入量は 1% 以下に制限すべきである。

なお、本研究に際し平成 17 年度科学研究費補助金（基盤研究 C、課題番号 16560129）を活用したことを附記する。

参 考 文 献

- (1) McGeehan, J. A., et al., SAE Paper 991525.
- (2) Korcek, S., et al., Proc. Int. Tribology Conf. Nagasaki (2000), pp.71-78.
- (3) 五十嵐仁一, 自動車技術会シンポジウム講演論文集, No.08-00 (2000), pp.37-42.
- (4) Yamamoto, H., et al., Proc. Int. Tribology Conf. Nagasaki (2000), pp.1975-1980.
- (5) Sasaki, M., et al., SAE Paper 2000-01-1992.
- (6) 副島光洋, ほか 3 名, 機械学会論文集, Vol.58, No.545 (1992), pp.289-294.
- (7) 副島光洋, ほか 7 名, トライボロジスト, Vol.39, No.1 (1994), pp.43-50.
- (8) 副島光洋, ほか 5 名, 自動車技術会論文集, Vol.25, No.3 (1994), pp.140-146.
- (9) 副島光洋, ほか 5 名, 自動車技術会論文集, Vol.26, No.2 (1995), pp.82-87.
- (10) 副島光洋, ほか 4 名, トライボロジスト, Vol.40, No.8 (1995), pp.661-668.
- (11) Wakuri, Y., et al., SAE Paper 952471.
- (12) 副島光洋, ほか 2 名, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.3 (1997), pp.77-82.
- (13) Soejima, M., et al., Proc. 22nd CIMAC Int. Cong. on Combustion Engines, (1998), pp.593-608.
- (14) Soejima, M., et al., STLE Tribology Trans., Vol.42, No.4 (1999), pp.755-762.
- (15) Soejima, M., et al., Proc. Int. Tribology Conf. Nagasaki, (2000), pp.2005-2010.
- (16) 副島光洋, ほか 3 名, 自動車技術会論文集, Vol.32, No.4 (2001), pp.87-92.
- (17) 副島光洋, ほか 3 名, 自動車技術会論文集, Vol.32, No.4 (2001), pp.93-98.
- (18) Hamatake, T., et al., Proc. 23rd CIMAC Int. Cong. on Combustion Engines, (2001), pp.1425-1440.
- (19) Soejima, M., et al., Proc. 2nd World Tribology Cong. Vienna, (2001), pp.423-428.
- (20) Wakuri, Y., et al., Proc. 24th CIMAC Int. Cong. on Combustion Engines, (2004), pp.1-16.
- (21) 副島光洋, ほか 3 名, 工学部研究報告, No.38 (2001), pp.27-36.
- (22) 副島光洋, ほか 2 名, 工学部研究報告, No.39 (2002), pp.9-14.
- (23) 副島光洋, ほか 3 名, 工学部研究報告, No.39 (2002), pp.19-22.
- (24) 副島光洋, ほか 3 名, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.70-03 (2003), pp.15-18.