ギヤ油の耐焼付き性に及ぼす添加剤の影響*

市丸 和 徳^{*1} 和 泉 直 志^{*1}
木 村 稔^{*2} 小 堀 圭 志^{*3}

Effect of Lubricant Additives on Scoring-Proof Ability of Gear Oils

Kazunori ICHIMARU, Naoshi IZUMI,
Minoru KIMURA and Keishi KOBORI

Scoring-proof ability and frictional characteristics of oils containing solid lubricants such as molybdenum disulfide and graphite, a S-P type EP additive and organomolybdenum compounds such as MoDTP and MoDTC were evaluated by using a two-roller machine under a step load condition. In the case of the addition of molybdenum disulfide or graphite, scoring load and frictional conditions, such as coefficient of friction, surface temperature and the state of oil-film formation, were similar to those of the base oil in which those additives were not added. The addition of the S-P type EP additive and the organomolybdenum compounds improved the scoring limits. These improvements can be attributed to the formation of substances which inhibit the occurrence of scoring. The substance is insulating and has a high coefficient of friction in the case of the S-P type EP additive, while that is conductive and has a low coefficient of friction in the case of organomolybdenum compounds. Two diagrams of surface temperature-friction coefficient and insulating voltage-friction coefficient clarified the effects of these additives.

Key Words : Tribology, Lubrication, Gear Oil, Scoring, Rolling-Sliding Contact, Two-Roller Machine, Solid Lubricant, EP Additive, Organomolybdenum Compound

1. 緒 言

歯車装置に対する高負荷、高効率の要求から各種の極圧添加剤や固体潤滑剤を含むギヤ油が使用されている。しかし、その耐焼付き性や摩擦特性については4球試験による研究は数多く行われているのに対し、歯車歯面のがりすべり接触をシミュレートできる2円筒試験において検討した研究は少ない。

いっぽう、著者らはこれまで2円筒のがりすべり接触におけるスコ어링について、あらさ突起の干渉状態に着目した検討を行ってきた^{(1)~(4)}。すなわち無添加パラフィン系基油を使用して、試験円筒の加工目方向の組合せや2円筒の回転数比により、異なるあらさ突起のミクロな接触状態を設定して、その焼付きに及ぼす影響を検討してきた。したがって、同様な実験条件に対する各種添加剤を含むギヤ油の挙動を検討することは興味を持たれるところであり、また有用であると考えられる。

そこで、本報では2円筒試験により、S-P系極圧添加剤、固体潤滑剤、および有機モリブデンを添加したギヤ油の耐焼付き性と摩擦特性を漸増荷重方式による2円筒試験により検討した。ただし、加工目の組合せは従来と同じく周方向どうしと軸方向どうしの2種を設定したが、本報では添加剤の影響を検討することを主目的としたため、回転数比は無添加パラフィン系基油の実験結果によりばらつきの比較的少ないことが判明している⁽⁴⁾ 整数比2のみとした。

2. 実験方法

試験機は従来から使用している2円筒のがりすべり接触試験機⁽¹⁾であり、実験方法も既報の無添加パラフィン系基油による実験⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾と同じとした。試験円筒は高速側をD円筒、低速側をF円筒と呼ぶが、直径はいずれも60mmで、接触幅はF円筒により10mmに制限される。試験円筒の材種は両円筒ともSCM415H 浸炭焼入れ材 ($H_v=700\sim800$) である。

* 平成2年7月19日 九州支部佐賀地方講演会において講演、原稿受付 平成2年9月6日。

^{*1} 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1), ^{*2} 三菱重工業(株)航空宇宙システム製作所 (〒455 名古屋市港区大江町10),

^{*3} 東陶機器(株)技術本部 (〒802 北九州市小倉北区中島2-1-1)。

試験円筒の加工目組合せは、周方向どうし、および軸方向どうしの2種とした。周方向加工目をもつ試験円筒は円筒研削盤により、また軸方向加工目をもつ試験円筒は工具研削盤により仕上げ、いずれの場合も初期表面あらさを $Ra=0.3\mu m$ とした。

D円筒の回転速度は3600rpm、D/F両円筒の回転数比は整数2とした。滑り速度は約5.65 m/sである。実験は各荷重段階の負荷運転時間30minの漸増荷重方式で行ない、25 kN/m² ~ 200 kN/m² は25 kN/m²、200 kN/m² ~ 500 kN/m² は50 kN/m²、500 kN/m² ~ 800 kN/m² は100 kN/m²の増分で荷重を増加させ損傷発生まで運転した。

試験油は油温 $55\pm 1^\circ C$ 、油量 400ml/minで接触入口側から強制給油した。対象とした試験油の性状を表1に示す。試験油は基油(A)、基油に固体潤滑剤を添加したもの(B:二硫化モリブデン MoS₂, C:グラファイト, D:MoS₂+グラファイト)、基油に有機モリブデンを添加したもの(E, G:モリブデン・ジチオ・フォスフェート MoDTP, F:モリブデン・ジチオ・カーバメイト MoDTC)、SP系極圧添加剤を含むギヤ油(H)、このSP系ギヤ油に固体潤滑剤を添加したもの(I)、MoDTCを添加したもの(J)の10種である。粘度グレードはいずれもISO VG 220に相当する。なお、添加した固体潤滑剤のMoS₂およびグラファイトの粒径は0.7~1 μm 、有機モリブデンの添加濃度はモリブデン濃度で400ppm(E)または220ppm(F, G)である。

各荷重段階の負荷運転中は、電気抵抗法により2円筒間の分離電圧を測定し油膜形成状態を評価した。ただし、試験円筒に並列に入れた抵抗は約111 Ω である⁽¹⁾。また、高速側D円筒駆動軸に貼付けたひずみゲージにより測定したねじりモーメントから摩擦係数を、極めて軽い荷重でD円筒に接触させた熱電対により円筒の表面温度を測定した⁽¹⁾。

3. 実験結果および考察

3・1 焼付き発生荷重 焼付き発生荷重はプロット記号とともに表1に付記した。まず加工目による比較では、無添加パラフィン系基油による場合⁽²⁾⁽⁴⁾と同様に、加工目が滑り方向と平行な周方向加工目(以下C/Cと略記)より直交する軸方向加工目(以下A/A)の方が焼付き発生荷重は高い。なお、MoDTP 220ppm添加油(G)では焼付き発生荷重がC/Cで700kN/m²とA/Aの400kN/m²よりかなり高いが、350 kN/m²で瞬間的に摩擦力が上昇し焼付きの兆候を示していた。このような加工目方向による焼付き発生荷重の違いはあるものの、両者の間にはほぼ対応関係がみられ、添加剤の影響が明瞭に表れている。

次に基油(A)を基準に各添加油の耐焼付き性について検討する。基油(A)の焼付き発生荷重はC/Cで150kN/m²、A/Aで350kN/m²である。固体潤滑剤添加油(B, C, D)ではC/Cの焼付き発生荷重は125~150kN/m²、A/Aでは300~350kN/m²と添加効果は認められない。SP系極圧剤添加油(H, I, J)では、

表1 試験油および焼付き発生荷重

Test oil	A	B	C	D	E	F	G※	H	I	J
	Base oil	A+ MoS ₂ 0.5%	A+ graphite 0.5%	A+ graphite 0.25% MoS ₂ 0.25%	A+ MoDTP 400ppm	A+ MoDTC 220ppm	A+ MoDTP 220ppm	S-P type EP gear oil	H+ Graphite 0.1% MoS ₂ 0.4%	H+ MoDTC 220ppm
Density 15/4°C	0.895	0.898	0.896	0.896	0.895	0.896	-	0.897	0.901	0.899
Viscosity cSt	40°C	230.9	215.2	215.1	213.8	218.2	224.0	-	225.4	223.3
	100°C	19.22	18.71	18.89	18.77	18.73	19.10	-	18.81	18.56
Viscosity index	94	96	98	98	96	96	-	93	95	94
Total acid number mg KOH/g	0.01	0.06	0.01	0.04	0.62	0.10	-	0.54	0.57	0.61
Total alkali number mg KOH/g	0.14	0.13	0.14	0.14	0.12	0.05	-	0.54	0.51	0.58
Scoring load kN/m ²	C/C	150	150	125	150	350	150	700	250	250
	A/A	350	300	300	350	800†	450	400	800†	600
Symbol for plot	○	●	●	●	①	⊖	⊕	◇	◆	◇

※: mixture E and A in the weight ratio of 1:0.818 †: No Scoring

単独の場合 (H) に比べ固体潤滑剤や MoDTC を加えた場合 (I, J) には焼付き発生荷重が低下することがあるものの、基油と比較すれば、C/C で 175 ~ 250 kN/m, A/A で 600 kN/m 以上とかなり耐焼付き性が向上している。MoDTP 400ppm 添加油 (E) は、A/A では設定した荷重では焼付いておらず、また、C/C でも焼付き発生荷重は 350 kN/m とかなり良好な耐焼付き性を示した。MoDTC 添加油 (F) はこれに比べて焼付き発生荷重は低い (C/C : 150 kN/m, A/A : 450 kN/m) が、MoDTP 添加油でも Mo 濃度が低い場合 (G), A/A では 400 kN/m で焼付きが発生していることから、これがタイプの違いによるものかどうかはわからない。

3・2 摩擦係数と表面温度 図1に荷重増にもなる摩擦係数 f の変化を各荷重段階における最大値と最終値の平均値により代表させて示す。摩擦係数についても無添加パラフィン系基油の場合⁽²⁾⁽⁴⁾と同様に C/C より A/A の方が低く、加工目による焼付き発生荷重の違いの一因となっている。また、添加剤の種類によっても摩擦係数は明瞭な違いを示す。

まず、C/C について検討する。いずれの試験油につ

いてもごく初期の荷重段階 (25 kN/m, 50 kN/m) では摩擦係数は $f = 0.02 \sim 0.03$ と低いが、75 kN/m ないし 100 kN/m で急上昇する。その後は基油および MoS₂, グラファイトでは荷重が増大するにつれ摩擦係数は上昇を続け、この上昇過程で焼付きが発生している。このように MoS₂ やグラファイトの添加によっては摩擦低減効果も耐焼付き性の向上も認められない。SP 系極圧剤添加油では、固体潤滑剤や MoDTC をこれに加えたものも含めて、摩擦係数はこの基油および固体潤滑剤のグループと同様に荷重とともに上昇するが、基油・固体潤滑剤グループが焼付く荷重 (150 kN/m) でも焼付かず、それ以後摩擦係数の値は高いもののゆるやかに低下に向かう。有機モリブデン添加油では 75 kN/m ないし 100 kN/m で摩擦係数は上昇するもののその値は低く、それ以後は荷重とともに低下に向かう。このように C/C では摩擦係数の変化は、基油および固体潤滑剤のグループ、SP 系極圧剤添加油のグループ、および有機モリブデンの3つのグループに分類される。

A/A では摩擦係数の値が C/C に比べ低いため、試験油による違いは C/C ほど明瞭ではないが、SP 系極圧剤添加油の摩擦係数が高いのに対し、有機モリ

(a) circumferential/circumferential (C/C)

(b) axial/axial (A/A)

図1 摩擦係数 f (各荷重段階における最大値と最終値の平均) の変化

(a) circumferential/circumferential (C/C)

(b) axial/axial (A/A)

図2 各荷重段階の負荷運転終了時の高速側D円筒の表面温度 T

ブデンでは低いことがわかる。

図2に各荷重段階の負荷運転終了直前のD円筒の表面温度を示す。表面温度は荷重の増加とともに上昇し、摩擦係数の高いSP系極圧添加剤添加油では高く、摩擦係数の低い有機モリブデン添加油では低い傾向がみられる。また、基油および固体潤滑剤添加油ではC/C、A/Aとも表面温度130~150℃が焼付き限界であるのに対し、SP系極圧剤添加油や有機モリブデン添加油ではこれよりもかなり高温になっても焼付かない場合が多く、添加剤の効果があらわれているといえる。

3.3 円筒間分離電圧 図3に電気抵抗法により測定した両円筒の平均的分離電圧 E_{ab} を各荷重段階の負荷運転終了直前について示す。この E_{ab} は完全分離時には14.9mVを示す。なお、500kN/m以上の高荷重では E_{ab} は0mVを示したので省略した。荷重の増大とともに E_{ab} は低下するのが全体的傾向である。基油および固体潤滑剤のグループでは、C/C、A/Aとも $E_{ab}=0$ mVに低下すると間もなく焼付いている。このグループについては焼付き発生限界の表面温度がいずれも150℃付近にあることから、表面温度上昇による油膜形成状態の悪化が焼付きの発生に結びついた

ものと考えられる。これに対し、SP系ではこのグループより E_{ab} が高く、有機モリブデン添加油では逆に低い傾向が認められる。

図4は無次元膜厚比 Λ を無次元膜厚比 Λ で整理したものである。無添加パラフィン系基油による実験では、マイクロEHL作用によりC/CよりA/Aの方が油膜形成状態が良好で、同一の Λ に対しては E_{ab} が高い傾向を示した⁽²⁾⁽⁴⁾。基油と固体潤滑剤を含む油に対してはこれがそのまま成立する。SP系極圧添加油ではこれらのグループに比べてC/C、A/Aとも E_{ab} は高く、有機モリブデン添加油では逆に低い。また、両グループは同一の Λ に対するC/CとA/Aにおける E_{ab} の違いが、EHL膜が潤滑膜の主体と考えられる基油ほど顕著ではないこと、SP系極圧添加剤、有機モリブデンとも極圧皮膜または低摩擦物質を生成することを目的とした添加剤であることから、接触域で何等かの反応物、すなわちSPでは比較的摩擦抵抗の大きい絶縁性の、有機モリブデンでは低摩擦の導電性の反応物が生成されているものと推定される。

3.4 各荷重段階における摩擦特性の変化 図5に各荷重段階における負荷運転中の摩擦係数 f と表

(a) circumferential/circumferential (C/C)

(b) axial/axial (A/A)

図3 各荷重段階の負荷運転終了時の円筒間分離電圧 E_{ab} (完全分離は14.9mV)

(a) circumferential/circumferential (C/C)

(b) axial/axial (A/A)

図4 無次元膜厚比 Λ と円筒間分離電圧 E_{ab} の関係 (各荷重段階の負荷運転終了時)

面温度 T の変化を、図6に円筒間分離電圧 E_{ab} と摩擦係数 f の関係を代表例で示す。基油の場合C/C [図5(a), 図6(a)] では既に報告したように⁽³⁾, 負荷運転の開始とともに表面温度が上昇し油膜形成状態が悪化 (E_{ab} 低下) して摩擦係数が上昇するが、運転とともに表面がなじむため摩擦係数が減少に転じるとともに油膜形成状態が改善され (E_{ab} 上昇) 表面温度も低下に向かう。しかし、この一荷重段階中の摩擦係数の変化はA/A [図5(b)] では小さい。そのため、以下C/Cについて比較する。

固体潤滑剤添加油 [図5(c)] では基油 [図5(a)] とほぼ同じ傾向を示す。有機モリブデン [図5(d)(e)] の場合は運転開始後早期に f の低下が始まり、荷重増とともにその極大値も低下し、荷重段階によって T - f の関係は異なった経路をとり、焼付きに遷移しにくい方向に変化する。S-P系極圧添加剤を含むもの [図5(f)(g)(h)] は T の上昇につれて f は上昇し、 T がほぼ120℃を越えると T に対する f の変化は小さくなって

おり、S-P系極圧添加剤を含むものは有機モリブデンとは異なり摩擦係数は表面温度によって支配されている。このように負荷運転中の摩擦特性の変化も、基油と固体潤滑剤添加油のグループ、S-P系のグループ、基油に有機モリブデンを添加したグループの3つに分類される。低モリブデン濃度の有機モリブデン添加油の場合焼付き発生荷重にばらつきが大きい、摩擦特性は耐焼付き性を向上させる可能性のあることを示している。

また、摩擦係数と分離電圧の関係についても添加剤により異なったパターンを示すことが図6よりわかる。すなわち、基油では分離電圧の変化が摩擦係数の変化に反映されやすい。これに対し、S-P系については図6(b) に示すように運転開始後に分離電圧が低下し摩擦係数が上昇した後、分離電圧が基油に比べてかなり上昇しても、これが必ずしも摩擦係数の低下に結びつかず、摩擦係数が上昇を示す場合もある。いっぽう、有機モリブデン [図6(c)] については低荷重の場合を

図5 一荷重段階中の表面温度 T と摩擦係数 f の変化 (プロット間隔は1 min, 矢印が時間の経過方向)

図6 一荷重段階中の円筒間分離電圧 E_{ab} と摩擦係数 f の変化
(プロット間隔は 1 min, 矢印が時間の経過方向, プロット記号は図5と同じ)

除き E_{ab} がほぼ 0 mV を示しながら摩擦係数が変化している場合が多いが, 100kN/m²では負荷運転の後半で E_{ab} の低下につれて摩擦係数が低下している。

円筒間分離電圧 E_{ab} の変化が油膜 (EHL膜) 形成状態によるものか表面 (反応) 膜形成によるものか判別は難しく, 摩擦係数についても表面の形状のなじみや温度の影響も受けると考えられるので判断は難しいが, これらの E_{ab} - f の変化は前述の $\Delta - E_{ab}$ の関係とあわせて, 運転にともない S-P 系のグループでは摩擦係数の高い絶縁性の, 基油に有機モリブデンを添加したグループでは導電性で摩擦係数の低い表面膜が形成されることの傍証になると考えられる。

以上の結果から, 反応性の低いと考えられる基油と固体潤滑剤添加油では温度上昇による油膜の破断が焼付きの発生と結びつきやすいが, S-P 系極圧剤添加油では摩擦抵抗が小さいわけではないが焼付きへの遷移を防止する比較的絶縁性の表面膜が形成され, 有機モリブデン添加油では摩擦抵抗が小さい比較的導電性の物質が接触域において形成され, それぞれ耐焼付き性が向上するものと考えられる。なお, 表面あらさ変化に及ぼす添加試験油の影響は表面が $H_v=700$ と硬いこともあってか認められなかった。

4. 結 言

周方向および軸方向加工目をもつ浸炭焼入れローラを用いた漸増荷重方式による 2 円筒試験により, 固体潤滑剤, S-P 系極圧添加剤, および有機モリブデンを添加したギヤ油の耐焼付き性と摩擦特性を検討したところ, 以下の知見を得た。

(1) 添加剤を含む試験油についても周方向加工目どうしの組合せより, 軸方向どうしの組合せで焼付き発生荷重が高い。

(2) 固体潤滑剤であるグラファイトおよび二硫化モリブデンの添加によっては耐焼付き性, 摩擦特性の改善は認められなかった。

(3) S-P 系極圧添加剤を含む試験油については, 固体潤滑剤や有機モリブデンを添加した場合を含めて耐焼付き性が向上するが, 摩擦係数は比較的高い値を示した。

(4) 有機モリブデンを基油に添加した場合には耐焼付き性が向上するとともに, 摩擦係数も低下した。ただし, モリブデンの添加濃度が低い場合には効果が低かった。

(5) S-P 系極圧添加剤および有機モリブデンの添加効果は, 前者では電気絶縁性の, 後者では導電性の反応物質が接触部で生成されることによるものと推測された。

各種添加剤を含む試験油について 2 円筒試験を行った結果を報告したが, 添加剤の作用機構の解明については今後の課題である。最後に, 試験油を提供していただいた (株) コスモ総合研究所石油技術研究所の方々に感謝の意を表します。

文 献

- (1) 市丸ほか 3 名, 機論, 52-473 (昭 61) C, 113.
- (2) 市丸ほか 2 名, 機論, 52-479 (昭 61) C, 1959.
- (3) 市丸ほか 1 名, 機論, 52-484 (昭 61) C, 3264.
- (4) 市丸ほか 2 名, 機論, 53-485 (昭 62) C, 157.