精密研削面における鉱油基油の耐焼付き能*

小幡文雄^{*1}, 竹平昭暢^{*2}
松尾浩平^{*3}, 佐伯親^{*3}Antiseizure Capacities of Mineral Base Oils
on Finely Ground SurfacesFumio OBATA, Akinobu TAKEHIRA,
Kohei MATSUO and Shin SAEKI

As a basic study to determine a simple method of improving the scoring resistance of a gear pair without using EP oils with marked chemical reactivity, the antiseizure capacities of mineral base oils on finely ground surfaces were examined by two-cylinder testing. The results were compared with those on roughly finished surfaces. The capacities significantly decrease with an increase in specific sliding even if the surfaces are finely finished. In the lower specific sliding range, the capacities are great without regard to the contact surface roughness and oil viscosity. Furthermore, in the lower range, the friction coefficient decreases with decreasing surface roughness and is independent of the oil viscosity. The thinner oil has a superior cooling effect to that of the thicker one. Finally on the basis of these results fundamental standpoints are proposed for the design of scoring resistance of a gear pair.

Key Words: Lubrication, Gear, Surface Roughness, Friction, Seizure, Scoring, Mineral Base Oil, Specific Sliding, Viscosity, Bulk Temperature

1. 緒 言

高速・高負荷歯車の強さ設計においては潤滑上の損傷であるスコアリングに対する配慮が不可欠であるが、化学反応性の高い極圧油の開発によって歯車のスコアリング強さは著しく向上した。しかし、極圧油の使用によって歯車潤滑上の問題がなくなったわけではない。極圧添加剤にはスコアリング強さを向上させる効果がある反面、潤滑油の劣化、金属の腐食を促進させるという重大な欠点がある。そこで、極圧油に過度に頼らないで歯車のスコアリング強さを向上させる簡便な方法が望まれる。

その一つの方法としては、歯面上の最大滑り率に注目した歯形設計が挙げられる。著者らが明らかにしたように、歯車のスコアリング強さと密接な関係にある潤滑油の耐焼付き能は滑り率の減少によって著しく増大する⁽¹⁾⁽²⁾。このことを反映して、純滑り接触となる歯先りょう干渉が発生しないように歯形修整しかつ、幾何学的かみあい歯面上の最大滑り率を小さくすれば、

平歯車のスコアリング強さは向上する⁽³⁾⁽⁴⁾。

もう一つの方法としては、歯面の精密仕上げが考えられる。石橋ら⁽⁵⁾は、CBN 砥石を用いて鏡面仕上げされた歯車の歯面強さが著しく高くなることを明らかにしている。歯車のスコアリングは潤滑膜の破断によって発生する損傷であるから、歯面粗さの改善によって歯車のスコアリング強さが向上することは十分考えられる。しかし、歯面の精密仕上げは生産コストを増大させる。前述のように潤滑油の耐焼付き能は滑り率と密接な関係にあることを考えれば、歯車のスコアリング強さに及ぼす歯面粗さの影響も歯面上の最大滑り率との関連において究明すべきである。

本報告はその基礎的研究であり、精密研削面における鉱油基油の耐焼付き能に及ぼす滑り率、滑り速度と粘度の影響を明らかにするとともに、接触面粗さが大きい場合の結果と比較・検討することによって、鉱油基油の耐焼付き能に及ぼす精密研削加工の効果を究明した。従来、潤滑油の耐焼付き能に及ぼす接触面粗さの影響を検討した研究はある⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、本報告のように滑り率および粘度を考慮してその影響を論じた研究はみられない。

* 原稿受付 平成4年5月6日。

^{*1} 正員、鳥取大学工学部(〒680 鳥取市湖山町南4-101)。^{*2} 正員、水産大学校(〒759-65 下関市永田本町2-7-1)。^{*3} (株)共石製品技術研究所(〒335 戸田市新曽南3-17-35)。

2. 試験機, 試験円筒および試料油

図1は, 実験に用いた二円筒試験機を示す。試験円筒間の滑り率は歯車対により強制的に与えた。荷重はばね力を利用して加え, その大きさは張力棒に張付けたはくひずみゲージで検出した。試験円筒の回転速度はコップ無断変速機により変えた。

図2は, 試験円筒の形状と寸法を示す。試験円筒の素材はSNCM 420 Hで, 1203 Kでガス浸炭, 1103 Kで油焼入れ, 173 Kでサブゼロ処理, 423 Kで焼戻し後, 所定の寸法に精密研削加工した。円周方向研削後の外周面(接触面)は約 $0.05 \mu\text{m} R_a$ (約 $0.5 \mu\text{m} R_{\text{max}}$)の軸方向粗さ, 700 HV以上の硬さであった。なお, 使用した砥石はWA 60 M 6 Vで, その寸法は, 外径395 mm, 内径152 mm, 幅50 mm, またその回転速度は

図1 二円筒試験機

図2 試験円筒の形状と寸法

1590 rpmであった。砥石のドレッシングには単石ダイヤモンドドレッサを用いた。ドレス条件, トラバース速度, 切込み量を適宜選択して所定の接触面粗さとした。また, 研削液はエマルジョンタイプ(20倍希釈)を用いた。

表1は, 実験に用いた試料油の性状を示す。いずれもパラフィン系鉱油基油で, 表1中の硫黄分は天然含有量である。試料油名は工業用潤滑油に関するISO粘度グレードに基づいたもので, VG 10, VG 68, VG 220の順に粘度が高くなる。比重および粘度指数に大差はない。給油温度323 KにおけるVG 220の粘度はVG 68の約3倍, VG 10の約20倍であった。なお, 動力伝達歯車用潤滑油の粘度グレードはVG 220が一般的であり, VB 10のような粘度グレードのものが用いられることは通常ない。

図3は, 試料油の粘度-圧力係数 α と大気圧下の粘度 η_0 の関係を示す。丸印は平均値, 実線は最小二乗法で求めた近似曲線である。弾性流体潤滑膜厚の計算に必要な α は, 両試験円筒外周面バルク温度の平均値に対する η_0 をこの近似曲線に適用して求めた。なお, 弾性流体潤滑膜厚は低圧における潤滑油の粘度-圧力係数の影響を大きく受けるので⁽⁸⁾, 粘度は落体式高压粘度測定装置を用いて, 311.0 K, 372.1 K, 423.2 Kの3種類の油温それぞれで, 大気圧から427 MPaまで

表1 試料油の性状

Items	VG10	VG68	VG220
Specific gravity (288/277 K)	0.8682	0.8784	0.8925
Flash point, K	449	531	561
Pour point, K	258.2	260.7	263.2
Kinematic viscosity, mm^2/s (313 K)	8.732	65.94	212.4
viscosity, mm^2/s (373 K)	2.377	8.659	18.50
Viscosity index	83	103	96
Sulfur concentration ⁺ , wt%	0.01	0.11	0.53

+ : natural content

図3 粘度-圧力係数 α と大気圧下の粘度 η_0 の関係

の6~7種類の圧力下で測定した。

3. 実験方法

高速側および低速側試験円筒外周面速度をそれぞれ u_h, u_l とするとき、高速側試験円筒の滑り率 σ_h は $(u_h - u_l)/u_h$ で、また滑り速度 V_s は $(u_h - u_l)$ で与えられる。実験は、表1に示した試料油に対し、 $\sigma_h = +30.1\% \sim +78.2\%$ で行った。試験機の許容回転速度の関係上、滑り速度は3.14 m/sと6.28 m/sを主体とした。なお、最高滑り速度は $\sigma_h = +78.2\%$ における12.6 m/sであった。

荷重は低荷重から段階的に増加させた。また、増荷中あるいは増速中に焼付かないようにするため、焼付き発生荷重が低くなる高滑り率では、低滑り率におけるよりも初期荷重および荷重増分を小さくした。なお、供試円筒の場合、ヘルツ応力 $p_{\max}$ [MPa]と荷重 P [kN]の関係は、 $p_{\max} = 693.0 P^{1/2}$ で与えられる。

各荷重段階における連続運転時間は、試験円筒外周面バルク温度がおおむね定常に達する600 sとした。起動後短時間で焼付くことを避けるため、試験機は無

負荷で起動し、低回転速度で負荷後、120 s以内に所定の回転速度にした。

焼付きの発生は、高速側試験円筒軸に連結するトーションバーで測定した摩擦トルクの急上昇から判定した。本実験では焼付き発生と同時に電動機の電源を切ったので接触面全体に損傷が及ぶことはほとんどなく、非焼付き部から焼付き発生直前の接触面の状態を知ることができた。運転中の両試験円筒外周面バルク温度は図2中の5 mmの接触幅の中央に対応する位置で接触面下0.9 mmに設置した熱電対で測定し、高速打点温度計に記録した。試料油は (323 ± 1) Kに制御し、図1中に示すかみ込み側ノズルから500 mL/minで供給した。

4. 実験結果および考察

4.1 焼付き挙動 図4は、滑り速度 $V_s = 3.14$ m/sのときの各荷重段階運転終了直前における外周面バルク温度 T_b 、膜厚比 ξ_0 と摩擦係数 μ に及ぼす粘度と滑り率の影響を示す。図4中で s は焼付き発生直前の値であることを意味する。 T_b は両試験円筒外周面バルク温度のうちで高いほうの値である。 ξ_0 は弾性流体潤

図4 焼付き挙動に及ぼす粘度と滑り率 σ_h の影響 ($V_s = 3.14$ m/s)

滑膜厚と実験前の両試験円筒外周面軸方向の二乗平均平方根粗さから求めた合成粗さとの比である。弾性流体潤滑膜厚は、両試験円筒外周面バルク温度の平均値に対する粘度を Grubin の式⁽⁹⁾に代入して求めた。ここで接触面の潤滑状態と膜厚比の関係は次のようである。すなわち、 $\xi_0 > 3.7$ のとき完全弾性流体潤滑状態、 $3.7 \geq \xi_0 > 0.3$ のとき混合潤滑状態、 $\xi_0 \leq 0.3$ のとき境界潤滑状態である^{(10)~(12)}。図 4 (b) 中に境界潤滑状態の目安となる $\xi_0 = 0.3$ の位置を破線で示したが、表面の突起同士の接触時間比がほぼ 100% となるのは $\xi_0 < 1$ のときである。なお、実験後、接触面非焼付き部の粗さを測定した結果、焼付き発生直前の接触面粗さは処女面と変わらないか、やや大きくなっていたことがわかった。以下、焼付き挙動に及ぼす粘度の影響が滑り率によってどのように異なるか検討する。

まず $\sigma_h = +30.1\%$ のとき、摩擦係数に及ぼす粘度の影響は無視できる。また、低荷重域を除けば摩擦係数は荷重の影響も受けない。いずれの試料油の場合も精密研削面では完全弾性流体潤滑ないしは混合潤滑状態といった突起間干渉頻度の低い状態での運転が可能であり、焼付きはそういった状態から発生している。ここで、VG 10 のように潤滑油膜形成上不利な低粘度油に関して注目すべきことを挙げれば次の二つである。一つは、低粘度油といえども低滑り率では高粘度油に匹敵する耐焼付き能を発揮する。もう一つは、同じような摩擦係数であるにもかかわらず外周面バルク温度が低いことからわかるように、低粘度油の冷却効果は高粘度油よりも優れている。

次に $\sigma_h = +58.9\%$ のとき、VG 10 より粘度の高い VG 68, VG 220 の摩擦係数は荷重増加によってわず

かしか増大しない。一方、VG 10 の摩擦係数は初期荷重ではほかの試料油と大差ないが、 $P = 2 \text{ kN}$ までは荷重の増加に伴って徐々に増大している。膜厚比からこれは接触面の潤滑状態と関連していることがわかる。つまり、VG 68, VG 220 の場合、接触面は完全弾性流体状態か、混合潤滑状態であっても突起間干渉頻度の低い状態である。それに対し VG 10 の場合は混合潤滑状態が主体であり、焼付きは境界潤滑状態から発生している。なお、VG 68 と VG 220 の焼付き発生荷重は同じであるのに VG 68 の焼付き発生直前の外周面バルク温度は VG 220 と比較して低い。これは、VG 220 の場合、起動後 369 s といった長時間経過してから焼付いたのに対し、VG 68 の場合は外周面バルク温度が大きく上昇中の 109 s で焼付いてしまったためである。

高滑り率である $\sigma_h = +78.2\%$ のとき、VG 10 とほかの試料油の焼付き挙動には大差があり、VG 10 では初期荷重でしかも混合潤滑状態から焼付いてしまい、焼付き発生直前の摩擦係数も高い。なお膜厚比から判断できるように、VG 10 のみならず VG 68, VG 220 でも焼付きは突起間干渉頻度の低い状態から発生している。これは、高滑り率では突起間干渉による潤滑油膜の局所的破断が焼付き発生の原因となることを示唆する。

以上、焼付き挙動に及ぼす滑り率と粘度の影響を明らかにしたが、精密研削面であっても滑り率が高くなるにつれて鉱油基油の耐焼付き能に及ぼす粘度の影響が大きく現れて、粘度が低くなるほど耐焼付き能は低下する。なお、 $V_s = 6.28 \text{ m/s}$ のときの焼付き挙動も上述の $V_s = 3.14 \text{ m/s}$ のときとほぼ同様であった。

4・2 耐焼付き能 図 5 は、焼付き発生荷重 P_s に及ぼす粘度と滑り率と滑り速度の影響であり、各滑り率ごとに得られた値の範囲と平均値を示す。なお、図 5 (b) 中の + 印は、450 K 近くの高い外周面バルク温度になっても焼付かなかったので実験を打ち切ったこ

(a) $V_s = 3.14 \text{ m/s}$

(b) $V_s = 6.28 \text{ m/s}$

図 5 焼付き発生荷重 P_s

とを意味する。また図5(b)で、0.25 kN 未満となった VG 10 の $\sigma_h = +78.2\%$ の P_s は省略した。いずれの試料油、滑り速度でも滑り率の減少に伴って焼付き発生荷重は高くなるが、その傾向は粘度が低くなるほど顕著である。高滑り率では粘度が高いほど焼付き発生荷重も高いが、滑り率の減少とともに焼付き発生荷重に及ぼす粘度の影響は小さくなって、 $\sigma_h = +30.1\%$ ではその影響は無視できる。なお、VG 68, VG 220 と比較して、粘度の低い VG 10 では焼付き発生荷重のばらつきが大きい。

図5に対応する、焼付き発生直前の外周面バルク温度 $(T_b)_s$ 、膜厚比 $(\xi_0)_s$ と摩擦係数 μ_s を図6に示す。 $(T_b)_s$ は滑り速度の影響をほとんど受けない。 $\sigma_h = +78.2\%$ といった高滑り率では、粘度が高くなるにつれて $(T_b)_s$ も高くなる。しかし、滑り率の減少とともに $(T_b)_s$ に及ぼす粘度の影響は小さくなって、 $\sigma_h = +30.1\%$ では粘度の影響ははっきりとは認められず、VG 10 でも 413 K を超えるような高い $(T_b)_s$ を示す。なお、 $V_s = 3.14 \text{ m/s}$ のとき、 P_s のばらつきを反映して、粘度が低いほど $(T_b)_s$ のばらつきが大きい。次に、

VG 10 の $V_s = 3.14 \text{ m/s}$ のときの一部を除けばいずれの試料油でも $(\xi_0)_s$ が 0.3 を超えていることからわかるように、焼付き発生直前の接触面は混合潤滑ないしは完全弾性流体潤滑に近い状態であり、しかも滑り率が高くなるほど $(\xi_0)_s$ は一般に大きくなる。 μ_s に及ぼす粘度の影響は低滑り率でははっきりしないが、滑り率が高くなるにつれて VG 10 の μ_s はほかの試料油より大きくなる。なお、滑り速度が高くなれば μ_s は全体的に小さくなる。

4.3 耐焼付き能に及ぼす精密研削加工の効果

4.3.1 低滑り率において 著者らは先に、歯車のスコアリング強さに及ぼす潤滑油粘度の影響を明らかにするための基礎的研究として、鉱油基油の耐焼付き能に及ぼす粘度、滑り率、滑り速度の影響を二円筒試験で検討した⁽¹³⁾。試料油は本実験と同じものであったが、試験円筒外周面軸方向の中心線平均粗さは、通常の表面硬化研削歯車の歯面粗さを対象にしたため、本実験の約7倍であった。その実験結果によれば、4.2節で明らかにした精密研削面における結果と同様、 σ_h

図6 焼付き発生直前の外周面バルク温度 $(T_b)_s$ 、膜厚比 $(\xi_0)_s$ と摩擦係数 μ_s

$\sigma_h = +30.1\%$ といった低滑り率では、鉱油基油の耐焼付き能に及ぼす粘度の影響は小さく、VG 10でも高荷重・高外周面バルク温度での運転が可能であった。このように低滑り率では接触面の粗さおよび潤滑油の粘度は焼付き発生にとって二次的因子でしかない。なお、高い耐焼付き能が得られた理由は接触面の粗さで次のように異なっていた。つまり、精密研削面の場合は、潤滑油膜形成に不利な VG 10 でさえ焼付きは主として混合潤滑状態から発生したことが物語っているように(図 6)、高荷重域でも突起間干渉頻度が低かったことによる。一方接触面粗さが大きい場合は、接触面のなじみと酸化膜の生成によって境界潤滑状態での運転が可能であったことによる。

次に摩擦係数に関して述べれば、図 4 (a) で明らかにしたように、精密研削面では摩擦係数は小さくかつ、摩擦係数に及ぼす粘度の影響は無視できるとともに、荷重の影響もわずかである。それに対して接触面粗さが大きい場合⁽¹³⁾、VG 10 の摩擦係数は、低荷重で境界潤滑状態となったことがあって低荷重域では VG 68、VG 220 の摩擦係数よりかなり高かったが、荷重の増大とともに接触面のなじみ効果が顕著に現れて減少し、高荷重域では VG 68、VG 220 の摩擦係数と大差なくなった。

4・3・2 中・高滑り率において 歯車のスコーリングは滑り率の高い部位から発生しやすいといわれているが、それは低滑り率と比較して高滑り率では潤滑油の耐焼付き能が著しく低くなることが関係していると考えられる。そこで次に、 $\sigma_h \geq 41.9\%$ の中・高滑り率における鉱油基油の耐焼付き能が接触面の精密研削加工によってどのように変化するか、接触面粗さが大きい場合の結果との比較から明らかにする。

図 7 は、焼付き発生荷重、焼付き発生直前の外周面バルク温度と摩擦係数に及ぼす接触面の精密研削加工の効果を示す。ここで ΣR_a を実験前の高速側および低速側試験円筒外周面軸方向中心線平均粗さの和とすると、図 7 中の値は、本実験条件である $\Sigma R_a \approx 0.1 \mu\text{m}$ で得られた結果の平均値と $\Sigma R_a \approx 0.7 \mu\text{m}$ であった前報⁽¹³⁾ で得られた結果の平均値の比または差である。詳しくは、 ζ_p は焼付き発生荷重の比、 $\Delta(T_b)_s$ と ζ_μ はそれぞれ焼付き発生直前の外周面バルク温度の差とそのときの摩擦係数の比である。なお、図 7 中の高滑り率において図 5、6 中の VG 10、VG 68 に対応する結果が示されていない箇所があるが、それは、焼付き発生荷重が 0.25 kN 未満となったところである。一般に、接触面粗さの向上によって焼付き発生荷重は増大するが、その程度は粘度が低くなるほど、また滑り率

が高くなるほど顕著である。焼付き発生直前の外周面バルク温度は、 $\sigma_h = +41.9\%$ では接触面粗さの向上、粘度の増加によってかえって低くなる場合もあるが、

(a) $V_s = 3.14 \text{ m/s}$ (b) $V_s = 6.28 \text{ m/s}$

図 7 焼付き発生荷重、焼付き発生直前の外周面バルク温度と摩擦係数に及ぼす精密研削加工の効果

高滑り率では接触面粗さの向上によってある程度高くなる。摩擦係数は精密研削加工によって大きく減少する。VG 220 よりも VG 10, VG 68 の ζ_μ が小さいことからわかるように、潤滑油膜形成上不利な低粘度油で摩擦係数に及ぼす精密研削加工の効果が大きい。なお、 $V_s=3.14$ m/s では滑り率が高くなるほど摩擦係数に及ぼす精密研削加工の効果が大きく現れているが、 $V_s=6.28$ m/s では滑り率には無関係である。また、図示してはいないが、VG 220 の $\sigma_h=+58.9\%$ と $\sigma_h=+78.2\%$ のみで比較が可能であった $V_s=9.42$ m/s のときの実験結果によれば、 ζ_p や $\Delta(T_b)_s$ に及ぼす滑り率の影響は図 7 と同様であったのに対し、 ζ_μ は滑り率が高くなることによって 0.53 から 0.74 へと大きくなった。

4・4 歯車のスコアリング強さ設計の基本的あり方
歯車のスコアリング強さに影響する多くの因子⁽¹⁴⁾の中で、潤滑油の性状は重要なものの一つである。現在のところ歯車のスコアリング防止には化学反応性の高い極圧油がもっぱら使用されているが、極圧油には緒言で指摘したような欠点がある。そこでここでは、スコアリングに対する安全性の十分高い歯車を極圧油に強く依存しないで実現するにはどのようにすればよいか、その基本方針について述べる。ただし、対象は表面硬化インポリュート研削歯車とする。

4・4・1 滑り率に関して 歯車のスコアリング強さ計算式は数多く提案されている⁽¹⁴⁾。しかし、かみあい歯面上の滑り率に主眼を置いたものは見当たらない。緒言でも述べたが、鉱油の耐焼付き能は滑り率の減少によって著しく増大する。したがって、歯車のスコアリング強さ設計にあたってはこの特性が最大限生かされるべきである。

4・3 節で明らかにしたように、中・高滑り率では接触面を精密に仕上げることによって鉱油基油の耐焼付き能は向上し、摩擦損失は減少する。しかもその効果は潤滑油膜の形成上不利な低粘度油において顕著である。しかし、本実験程度の精密仕上げでは、高滑り率における鉱油基油の耐焼付き能は $\sigma_h=+30.1\%$ のときと比較してかなり低い。このことより、突起間干渉による潤滑油膜の局所的破断が焼付き発生の原因となる高滑り率において、低滑り率なみの耐焼付き能を鉱油基油で発揮させるには、接触面を超精密仕上げするとともに粘度を高くして突起間干渉が発生しないようにしなければならないことが容易に想像できる。しかし、超精密仕上げは生産コストを増大させる。また粘度を高くすれば、歯面上での油の広がりが悪くなって、油の歯面冷却効果が低下するなどの危険性がでてくる。

以上のほかに、かみあい歯面上の最大滑り率を小さくすれば平歯車のスコアリング強さは向上するという実験結果⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を考え合すれば、かみあい歯面上の最大滑り率を極力小さくすることがスコアリング強さの高い歯車を設計するための基本であるといえよう。具体的には、幾何学的かみあい歯面上の最大滑り率が+35%未満になるように転位係数を定めることである。もしもかみあい率の関係上平歯車ではそれが困難であれば、はすば歯車を採用しなければならぬ。そのようにすれば、鉱油基油のもつ低滑り率での高い耐焼付き能(図 5, 6)が歯車のスコアリング強さの向上に生かされて、従来のように化学反応性が過度に高い極圧油を歯車潤滑に用いる必要性はなくなるであろう。なお、転位係数を定めるにあたっては歯の曲げ強さ、歯面強さも勘案しなければならない。また、純滑り接触となる歯先りょう干渉が発生しないように歯形修整することも当然である。

4・4・2 歯面粗さと潤滑油の粘度に関して 次に歯面粗さと潤滑油の粘度に関してであるが、4・3 節の検討結果から判断して、4・4・1 項で述べた方針に従って設計された低滑り率の歯車であれば、歯面を精密に仕上げることも高粘度油を使用することも必須条件ではない。しかし、接触面粗さが大きいほどまた粘度が低くなるほど突起間干渉頻度の増大によって騒音が大きくなるため、そのような低滑り率の歯車であってもある程度以上の膜厚比は確保すべきである。つまり、前報⁽¹³⁾で提案したように、幾何学的かみあい歯面上の滑り率が最大となるかみあい位置において、給油温度、設計荷重と処女面粗さに対する膜厚比を 1 以上、できれば 3.7 以上にするのである。なお、高速・高負荷歯車では運転中の歯面温度は高くなるが、歯面温度の上昇は歯車のスコアリング強さのみならず歯の曲げ強さ、歯面強さに影響を及ぼしかねない。4・1 節で述べたように低粘度油は高粘度油よりも冷却効果が優れているので、歯面を精密に仕上げてできるだけ低粘度の潤滑油を使用することは、歯車の強さおよび運転性能の向上にとって望ましい。

4・4・3 スコアリング発生温度などの推定式 著者らの研究⁽⁴⁾によれば、混合潤滑状態における平歯車のスコアリング発生作用歯面バルク温度は二円筒試験における焼付き発生外周面バルク温度でよく近似できる。このように、作用歯面バルク温度は歯車のスコアリング発生にとって重要である。そこで以下では、本報告ならびに前報⁽¹³⁾で得られた実験結果から重回帰解析によって得られた、鉱油基油を用いる場合のスコアリング発生時の作用歯面バルク温度と膜厚比と摩擦

係数を推定するための計算式を示す。

まず最初に、スコーリング発生時の作用歯面バルク温度 $(T_b)_s$ の推定値は次式で与えられ、重相関係数は 0.82 である。

$$(T_b)_s = 489 \sigma_h^{-0.29} \bar{V}_s^{0.018} \xi_{oil}^{0.0074} \quad [K] \dots \dots \dots (1)$$

ここに σ_h は、幾何学的かみあい始めの被動歯車の滑り率と幾何学的かみあい終りの駆動歯車の滑り率を比較して大きいほうである。 $\bar{V}_s$ は σ_h に対応するかみあい位置における無次元滑り速度であり、 $\eta_0 V_s / E' R$ で与えられる。 η_0 は給油温度に対する粘度、 V_s は滑り速度、 E', R はそれぞれ歯車の等価縦弾性係数と相対曲率半径である。 ξ_{oil} は給油温度、推定スコーリング発生荷重、処女面粗さに対する膜厚比である。なお、駆動歯車と被動歯車の処女面粗さは、歯すじ方向と歯形方向の粗さのうちで大きいほうをそれぞれ選択する。

$(T_b)_s$ を安全側に見積もるときは次式を使用する。

$$(T_b)_s = 489 \sigma_h^{-0.29} \bar{V}_s^{0.018} \xi_{oil}^{0.0074} - 40 \quad [K] \dots \dots \dots (2)$$

なお、式(1)あるいは式(2)で求めた $(T_b)_s$ が給油温度以下となれば、設計をやり直すか、極圧油の使用を考える。

次に、スコーリング発生時の膜厚比 $(\xi_0)_s$ の推定値は次式で与えられ、重相関係数は 0.90 である。

$$(\xi_0)_s = 0.042 \sigma_h^{2.3} \bar{V}_s^{-0.15} \xi_{oil}^{0.76} \dots \dots \dots (3)$$

なお、膜厚比から歯面の潤滑状態を推定するにあたっては、4・1 節で述べたことを適用すればよい。

最後に、スコーリング発生時の摩擦係数 μ_s の推定値は次式で与えられ、重相関係数は 0.81 である。

$$\mu_s = 0.59 \sigma_h^{-0.11} \bar{V}_s^{0.093} \xi_{oil}^{-0.32} \dots \dots \dots (4)$$

5. 結 言

潤滑油の化学反応性を不必要に高くしないで歯車のスコーリング強さを向上させる簡便な方法を見出した

めの基礎として、精密研削面における鉱油基油の耐焼付き能に及ぼす粘度、滑り率、滑り速度の影響を二円筒試験で明らかにするとともに、接触面粗さの大きい場合の結果と比較・検討した。

精密研削面といえども滑り率が增大すれば耐焼付き能は大きく低下する。中・高滑り率では、突起間干渉による潤滑油膜の局所的破断が焼付き発生の原因となるため、精密研削面であっても粘度が低くなれば耐焼付き能は低下し、摩擦係数は高くなる。一方低滑り率では、接触面粗さが大きければ突起間干渉で生成された酸化膜の焼付き防止効果が期待できるため、耐焼付き能は接触面粗さ、粘度にはほぼ無関係でしかもかなり高い。また、低滑り率における摩擦係数は、接触面を精密仕上げることによって小さくなるとともに、粘度の影響を受けなくなる。低粘度油の冷却効果は高粘度油より優れている。以上の研究成果を踏まえて、歯車のスコーリング強き設計の基本的あり方について最後に述べた。

文 献

- (1) 藤田・小幡, 機論, 49-445, C (1983), 1521.
- (2) 藤田・ほか 2 名, 機論, 50-457, C (1984), 1612.
- (3) 藤井・ほか 4 名, 機論, 55-512, C (1989), 1017.
- (4) 藤井・ほか 3 名, 機論, 56-523, C (1990), 750.
- (5) 石橋・ほか 2 名, 機論, 50-456, C (1984), 1484.
- (6) Staph, H. E., Ku, P. M. and Carper, H. J., *Mechanism and Machine Theory*, 8 (1973), 197.
- (7) 平野・ほか 3 名, 機論, 43-373, (1977), 3493.
- (8) 野中・ほか 5 名, 日本潤滑学会第 33 期春季研究発表会予稿集, (1989-5), 423.
- (9) Dowson, D. and Higginson, G. R., *Elastohydrodynamic Lubrication*, (1966), 70, Pergamon Press.
- (10) Poon, S. Y. and Haines, D. J., *Proc. Inst. Mech. Eng., Pt. 1*, 181 (1966/67), 363.
- (11) Haines, D. J., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 185 (1970/71), 378.
- (12) 藤田・ほか 2 名, 機論, 47-423, C (1981), 1518.
- (13) 小幡・ほか 3 名, 機論, 58-547, C (1992), 903.
- (14) 日本機械学会編, 技術資料 歯車強き設計資料, (1979), 75.