接触電気抵抗による境界潤滑の検討*

丸井悦男^{*1}, 遠藤弘樹^{*2}

Examination of Boundary Lubrication by Contact Resistance

Etsuo MARUI and Hiroki ENDO

The mean contact pressure of a machine tool slideway is relatively low, and its sliding velocity is also low. Many such contact surfaces are in a boundary lubrication state. In this report, the electric contact resistance between model contact surfaces under boundary lubrication is precisely measured and the boundary contact situation, especially the information on adsorbed lubricant film, is investigated. The result is compared with the static friction measurement on the real rough surfaces lubricated by various kinds of lubricants, and it is clarified that the information from electric contact resistance measurement has a strong correlation with the boundary lubrication in real rough surfaces.

Key Words: Tribology, Friction, Lubrication, Boundary Lubrication, Electric Contact Resistance, Guide Way, Experiment

1. ま え が き

電気接点の研究をしていた Holm によって考案された接触電気抵抗⁽¹⁾による接触機構の検討法は、電気接点の接触特性の研究⁽²⁾⁽³⁾ばかりでなく、表面の接触を伴うトライボロジーの種々の分野への応用が可能である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。Bowden ら⁽⁶⁾は、この接触電気抵抗法により真実接触面積、接触点の数などを推定し、接触電気抵抗法が表面測定のための有効な手段⁽⁷⁾になりうることを示した。その後、接触電気抵抗に対する表面粗さ⁽⁸⁾、酸化膜などの表面皮膜⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、荷重⁽¹¹⁾などの効果が調べられ、いわゆる乾燥状態での接触表面のようすが明らかにされてきた。一方で、接触電気抵抗法が潤滑された表面にも適用され、混合潤滑状態⁽¹²⁾⁽¹³⁾あるいは境界潤滑状態^{(14)~(16)}の把握、潤滑油への添加剤の効果⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾などが検証されている。川村は、接触電気抵抗と類似した電圧印加法により、潤滑膜の動的な観察を行っている⁽¹⁹⁾。

工作機械の案内面のように平均接触圧力が低くて

も、しゅう動速度が遅いときには、境界潤滑状態になりやすいものである。境界潤滑状態では、金属表面に吸着した潤滑油膜の特性を解明することが重要である⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。Smith ら⁽²²⁾は、静電容量法によって軟鋼、クロム表面などへの吸着膜の厚さを測定しているが、取扱われた表面は実際の接触面とはかなり異なったものである。静摩擦係数の印加電流依存性⁽²³⁾、金属表面へのガス吸着と電気伝導性の関係⁽²⁴⁾、金属表面と潤滑油分子との化学反応性についての電気化学的な研究⁽²⁵⁾などが行われ、貴重な知見が得られつつあるが、境界潤滑状態を根本的に理解するにはまだ資料不足の感がある。そこで本研究では、接触電気抵抗法により境界潤滑条件下での接触状態をどの程度把握しうるかをモデル接触部に関する実験から検討するとともに、表面粗さのある実際の接触面の境界潤滑状態と接触電気抵抗法により推定したモデル接触部の状態がどのような関係にあるかについても実験を行った。

2. 接触電気抵抗の測定

2-1 実験装置および方法 接触電気抵抗の測定に使用した実験装置の概略を図1に示す。装置の主要部は、強固な2枚の基盤F₁, F₂, 4本の柱Rによって支えられている。2個の直径25 mmの円筒状試験片

* 平成2年6月9日 東北支部八戸地方講演会において講演、原稿受付 平成3年5月10日。

^{*1} 正員、岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。

^{*2} 正員、オークマ(株) (〒480-11 愛知県丹羽郡大口町小口5-25-1)。

表 1 潤滑油

Lubricant	Molecular formula	Kinematic viscosity (23°C) mm ² /s	Concentration mol/m ³
Castor oil		838.1	
Liquid paraffin		197.1	
n-Decane	CH ₃ (CH ₂) ₈ CH ₃	1.186	
n-Decane + Caproic acid	CH ₃ (CH ₂) ₄ COOH	1.181	20
n-Decane + Caprinic acid	CH ₃ (CH ₂) ₈ COOH	1.184	20
n-Decane + Stearic Acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	1.186	20

図 1 接触電気抵抗測定のための実験装置

Tとベアリング用の鋼球Sにより接触面を構成した。試験片Tの間に鋼球Sをはさみ、油圧ジャッキJで全体を押し上げて接触部に所定の垂直荷重を負荷した。負荷時間は300sである。Pは雲母製の絶縁板である。垂直荷重の大きさは、荷重計Dに貼付したひずみゲージにより検出した。供試潤滑油は、アクリル製の容器V内に保持されている。接触部に所定の垂直荷重を加え、接触部を含む全体の測定回路に一定電流(100mA)を流したときの端子間の電圧をマルチメータで測定して、接触電気抵抗を求めた。実験は恒温室(室温23°C)内で行った。

試験片Tは、研削後バフ仕上げを施し、最大粗さが0.15μm以下になっている。またそのピッカース硬さは約180で、鋼球のピッカース硬さ900よりかなり小さな値である。

供試潤滑油の一覧を表1に示す。植物性の脂肪油であるひまし油、直鎖パラフィンの混合油である流動パラフィン、パラフィン系基油としてのn-デカンおよびn-デカンに3種類の脂肪酸を一定量添加したものを潤滑油として使用した。

2.2 乾燥状態における接触電気抵抗の測定結果

図2は、回路抵抗と接触抵抗の両者からなる全抵抗Rと垂直荷重Qの関係を乾燥状態において測定した一例である。図には3回分の測定結果を示してあるが、かなり実験結果の再現性がよいことがわかる。荷重の

図 2 乾燥状態での全電気抵抗

図 3 乾燥状態での接触電気抵抗

増加に従って金属接触面積が増すと、抵抗Rが減少し、最終的には一定値に漸近する傾向がみられる。そこで、 $Q=20$ kN 付近の電気抵抗を近似的に回路抵抗 R_0 とみなし、さらに接触面が2個あることを考慮して、次式によって乾燥状態での接触電気抵抗 R_d を求めた。

$$R_d = \frac{(R - R_0)}{2} \dots\dots\dots (1)$$

図3は、このようにして求めた接触電気抵抗 R_d と垂直荷重 Q との関係を両対数紙上に示したものである。どの鋼球径 D の場合にも両者の関係は両対数紙上で直線となっており、次式の形で表しうる⁽¹⁾。

$$R_d = aQ^{-b} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 a, b は接触面の形状および表面性状によって定まる量である。

2.3 潤滑状態における接触電気抵抗の測定結果

図4にひまし油で潤滑したときの全抵抗 R と荷重 Q の関係を示す。図には参考のため、乾燥状態での結果も併記してある。これらの結果から、次式により回路抵抗 R_0 を差し引いて、潤滑状態における接触電気抵抗 R_w を求めた。

$$R_w = \frac{(R - R_0)}{2} \dots\dots\dots (3)$$

図5, 6は、このようにして求められた潤滑状態での接触電気抵抗と乾燥状態での接触電気抵抗の比 R_w/R_d (以後、接触電気抵抗比とよぶ) と荷重 Q との関係を示したものである。図5において、デカンに各種脂肪酸を添加した潤滑油による結果にはほとんど差異が認められなかったため、1本の線 (Fatty acid 線) で表してある。いずれの実験条件の場合にも接触電気

図4 潤滑状態での全電気抵抗の比較

図5 接触電気抵抗比

図6 接触電気抵抗比

抵抗比は、荷重 Q に対してほぼ一定となっている。ひまし油、脂肪酸を添加した潤滑油の R_w/R_d の値は、添加剤がない場合に比較して大きくなっている。また鋼球の直径が大きいほど接触電気抵抗比が大きくなっていることがわかる。

3. 接触状態に関する考察

前章の接触電気抵抗に関する実験結果から境界潤滑状態での吸着油膜のようすについて検討するため、まず乾燥状態および潤滑状態における接触機構について考察する。

3.1 乾燥状態における荷重支持 試験片 T の降伏圧力を p_m とすると、試験片 T と鋼球 S の乾燥状態での接触における真実接触面積 A_{rd} は次のようになる。

$$A_{rd} = \frac{Q}{p_m} \dots\dots\dots (4)$$

3.2 潤滑状態における荷重支持 図7は、潤滑状態での試験片 T と鋼球 S の接触のようすを説明したものである。 T と S の表面には厚さ t_b の吸着油膜⁽²⁰⁾ が存在し、この吸着油膜接触部の面積が A_b である。内部には金属接触部があり、その面積は A_m である。 T, S の表面は完全には平坦ではなく、極めて微小な凹凸からできている。したがって、この微小な凹凸の間に吸着油膜片が閉じ込められて、閉じ込め油膜接触部⁽²⁰⁾ を作っていると考えられる。 A_m 中に占める真実金属接触部の面積割合を γ ($0 < \gamma \leq 1$) とすれば、真実金属接触面積 A_{rw} は $A_{rw} = \gamma A_m$ 、閉じ込め油膜接触部の面積は、 $A_c = (1 - \gamma) A_m$ である。

閉じ込め油膜接触部の圧力は極めて高く、金属の降伏圧力 p_m に等しいものとみなす⁽²⁰⁾。また吸着油膜接触部の圧力を p_b とし、 $C_2 = p_b/p_m$ とおく。垂直方向の力の釣り合い式より、

$$A_m + C_2 A_b = \frac{Q}{p_m} \dots\dots\dots (5)$$

図8は、接触部の詳細な寸法を示した説明図である。鋼球の押し込み深さを t_e 、金属接触部、吸着油膜接

図7 潤滑時の接触状態

触部の大きさ(半径)をそれぞれ r_1, r_2 とすると, A_m, A_b は次のようになる。

$$\begin{aligned} A_m &= \pi r_1^2 = \pi(D - t_e)t_e \\ A_b &= \pi(r_2^2 - r_1^2) = 2\pi(D - t_e)t_b \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

表面に吸着した油膜は荷重支持能を示し, 流動性が極めて低いため, 金属表面の接触部に引き込まれ, 閉じ込め油膜接触部ができる。吸着油膜が鋼球と平面にはさまれたとき, 接触周辺部の油膜は外部にスクイズアウトする可能性も考えられる。しかしながら, この油膜部の流動性が低いことから, ほとんどの油膜は接触部内に残ることになる。そこで, 鋼球と平面が接触するとき, 非接触状態で表面に形成されていた吸着油膜がすべて閉じ込め油膜接触部に引き込まれるものとする。その平均厚さを t_c とすると, $t_b A_m = t_c A_c = t_c(1 - \gamma)A_m$ の関係から,

$$\gamma = 1 - \frac{t_b}{t_c} = 1 - T_b \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。すなわち, 真実金属接触部の割合 γ は, 油膜の吸着状態と表面性状で定まることになる。式(7)の $T_b (= t_b/t_c)$ を以後, 吸着油膜厚さ比とよぶことにする。

3・3 接触電気抵抗の発生 乾燥状態での接触電気抵抗の発生については次のように考えられている⁽¹⁾。接触面を構成する微小な突起のうち, 実際に接触が生じている真実接触部を通して電流は流れる。この接触部は薄い酸化皮膜で覆われており, この皮膜を通じて電流が流れる際に皮膜抵抗を生じる。さらに, 微小な接触部へ電流が集中することにより, いわゆる縮流抵抗が生じる。この二つが, 接触電気抵抗発生の主な原因である。

表面が潤滑油膜で覆われている場合, トンネル効果による電流はほとんど無視することができ⁽¹¹⁾, 接触電気抵抗の発生は, 乾燥状態の場合とほぼ同様であると考えられる。

よって, 接触電気抵抗は乾燥状態, 潤滑状態を問わ

ず, 真実接触面積の大きさとその分布状態に依存することになる。乾燥状態に関する式(2), (4)から, 接触電気抵抗の垂直荷重依存性について次式の関係が得られる。

$$R_d A_{rd}^b = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (8)$$

また, 図5, 6にみられたように, 接触電気抵抗比 R_w/R_d が垂直荷重にかかわらず一定であったことから, 潤滑状態における接触電気抵抗 R_w も R_d と全く同じ性質の垂直荷重依存性を有しているものと考えられる。またその大きさは前述のように真実接触面積の大きさに依存すると考えてよいから,

$$R_w A_{rw}^b = R_d A_{rd}^b \quad \dots\dots\dots (9)$$

試験片Tと鋼球Sの接触における吸着油膜接触部の面積 A_b は, 金属接触部の面積 A_m に比較して極めて小さいことを考慮して(付録参照), $A_{rw} = \gamma A_m$ と式(4), (5), (7)の関係を式(9)に代入することにより,

$$\frac{R_w}{R_d} = (1 - T_b)^{-b} \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。この式は, 接触電気抵抗比が油膜の吸着状態と表面性状で定まることを示しており, 図5, 6の結果を説明するものである。

図9に式(10)から計算した接触電気抵抗比 R_w/R_d と吸着油膜厚さ比 T_b の関係を示す。図中のパラメータは, 接触電気抵抗の荷重依存性を示す指数 b である。吸着油膜厚さが大きく, T_b が大きくなると, 接触電気抵抗比は大きくなる。その程度は, 荷重依存性の指数 b が大きいほど大きくなる。

さて, 接触電気抵抗の実験結果と式(10)から, 吸着油膜厚さ比 T_b を計算することができる。計算に際して指数 b の値は図3などの接触電気抵抗の荷重依存性の程度から定めた。その結果を図10に示す。鋼球の直径が変化しても, T_b の値はn-デカンについてみる限り一定である。よって, 吸着油膜厚さ t_b は, 接触面の形状によらず潤滑油固有のものであることがわかる。また図5, 6の接触電気抵抗比と垂直荷重の関係についての実験結果を考慮すると, 吸着油膜厚さ比,

図8 接触状態の詳細

図9 接触電気抵抗比と吸着油膜厚さ比の関係

ひいては吸着油膜厚さ t_b は、荷重の大きさに関係しないこともわかる。

潤滑油の種類との関連で図 10 を考察してみる。ひまし油、 n -デカン、流動パラフィンの順に T_b が小さくなり、境界潤滑性能が劣化するものと考えられる。 n -デカンに炭素数の異なる 3 種の直鎖脂肪酸を添加すると、吸着油膜厚さ比が大きくなり、潤滑性能が改善される。添加剤の種類による差異はほとんど認められなかったため、図中ではその平均値として T_b の値を示してある。

4. 摩擦試験による検討

4.1 実験装置および方法 図 11 に摩擦試験に用いた実験装置の概略を示す。案内面 G、しゅう動面 S はともに S 45 C 製である。角ねじ T、板ばね K によりしゅう動体 S を低速（駆動速度 $v=0.00235$ mm/s）で駆動した。接触面は、接触電気抵抗実験の場合と同じ潤滑油によって潤滑されている。このとき、しゅう動体に作用する最大摩擦力 F を板ばねに貼付したひずみゲージ E により検出し、これをしゅう動体の自重による垂直荷重 Q により除して、最大摩擦係数 μ_s を求めた。

接触面は、仕上げ程度の異なる 4 種の平面研削加工面である。一般に平面研削仕上げされた面は、表面性状に強い方向性をもっている⁽²⁶⁾。表面性状に方向性をもつ面は、半だ円体状、半円筒状あるいは三角柱状などの微小突起の集合によって表示しうる。平面研削加工面では、この突起の形状を半だ円体状と仮定することがより妥当であると考えられるが、研削方向断面内

の半だ円体の主曲率半径を精度よく求めることが困難である。そこで本文では、平面研削面を研削方向と直角な方向に半円筒状の突起が多数分布しているものとしてモデル化した。突起半円筒の曲率半径 r は、研削方向に直角な方向で測定した粗さ曲線の突起先端形状に最もよく適合する円の半径として求めた。また突起の長さ l は、研削痕の長さを投影機で読み取ることによって求めた。全接触面内（幅 20 mm）に存在する突起の数は、代表幅（1 mm）に存在する突起数を粗さ曲線から推定することにより求めた。接触面内で突起半円筒は高さ方向に分布している。一番高いところにある突起と一番低いところにある突起の高さ方向の間隔を $H_{\max}$ とした。一番高いところ（ $z=0$ ）にある突起を基準として $z=0 \sim z$ の間にある突起数 I と全突起数 I_0 の比 $\phi = I/I_0$ と $z/H_{\max}$ の関係を粗さ曲線から求めた。本実験では平均接触面圧がそれほど高くはない（約 32 kPa）ので、接触に関与する突起は $z=0$ 付近に存在するものに限られる。そこで $\phi \sim z/H_{\max}$ 関係曲線の $z/H_{\max}=0$ 付近の曲線の傾き d を微小突起の分布係数として、突起の高さ方向の分布状態を、

$$\phi = \frac{I}{I_0} = d \frac{z}{H_{\max}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

の形で表示する。

表 2 に、表面性状因子をまとめて示す。表中の表面性状係数 K については後述する。

4.2 静摩擦係数の計算法 前節で説明した方法によって求めた静摩擦係数の実験値から、吸着油膜厚さを推定し、接触電気抵抗の測定結果との相関を検討する資料とするための静摩擦係数の計算法を以下に述べる。

図 10 吸着油膜厚さ比

図 11 摩擦係数測定のための実験装置

図 12 突起の接触状態

図12は、平行に置かれた2個の円筒状突起が接触し、互いに ϵ だけ接近した状態を示すものである。この図のように頂点同士が接触するような状態で接触2面上の突起が接触しているとは限らないが、表面性状が静摩擦係数に及ぼす影響を平均的に明らかにするため図12のような接触状態を取り扱った。円筒の半径を r とすると、接触幅 w は次のようになる。

$$w = 2\sqrt{r\epsilon} \quad \dots\dots\dots(12)$$

よって1組の突起の接触による金属接触面積 δA_m は、

$$\delta A_m = 2l\sqrt{r\epsilon} \quad \dots\dots\dots(13)$$

である。ただし、 l は円筒の長さである。

いま表面性状が同一である上下2面が a だけ接近したものとすると、接触突起個数 I_c は次のようになる⁽²⁷⁾。

$$I_c = \frac{I_0 d^2}{2H_{\max}^2} \int_0^a dz_1 \int_0^{a-z_1} dz_2 \\ = \frac{I_0 d^2}{2H_{\max}^2} a^2 \quad \dots\dots\dots(14)$$

全接触面積 A_m は、

$$A_m = \int_0^a \delta A_m \frac{dl_c}{da} da = Ka^{5/2} \quad \dots\dots\dots(15)$$

ただし、

$$K = \frac{4I_0 d^2 l \sqrt{r}}{5H_{\max}^2} \quad \dots\dots\dots(16)$$

この表面性状係数 K の値が表2に併記してある。

1面への吸着油膜厚さを t_b とすると、吸着油膜接触部面積 A_b は、次式で与えられる。

$$A_b = K\{(a+2t_b)^{5/2} - a^{5/2}\} \quad \dots\dots\dots(17)$$

金属接触面積中に占める真実金属接触部の割合を γ 、金属の降伏圧力を p_m 、せん断強さを s_m 、吸着油膜接触部に発生する圧力を p_b 、そのせん断強さを s_b とすると、垂直荷重 W および摩擦力 F は以下のように表される⁽²⁰⁾。

$$W = p_m A_m + p_b A_b \\ = p_m (A_m + C_2 A_b)$$

$$F = \gamma s_m A_m + s_b A_b \\ = p_m (C_1 \gamma A_m + C_2 C_3 A_b) \quad \dots\dots\dots(18)$$

ただし、 $C_1 = s_m/p_m$ 、 $C_2 = p_b/p_m$ 、 $C_3 = s_b/p_b$ である。よって最大静摩擦係数 μ_s は、

$$\mu_s = \frac{F}{W} \quad \dots\dots\dots(19)$$

となる。

4.3 結果および考察 以上の手法により、最大静摩擦係数 μ_s を表面性状係数 K の関数として計算した結果を図13に示す。図中のパラメータは吸着油膜の厚さ t_b である。計算に際して、 p_m 、 C_1 の値はビッカース硬さ試験、乾燥状態での摩擦係数の測定値から推定するとともに、その他の潤滑油の特性に関連する C_2 、 C_3 および γ の値は、種々の表面性状係数 K に対して求めた最大静摩擦係数 μ_s の計算値が実測値に最もよく適合するように定めた既報⁽²⁰⁾の値を採用した。また図中には、各種潤滑油による実験結果も併記してある。図より表面性状係数 K が大きく、吸着油膜厚さが大きい接触面ほど、 μ_s が小さくなっていることがわかる。流動パラフィンで潤滑した接触面での実験点は $t_b = 0.03 \mu\text{m}$ の曲線上に、 n -デカンの場合には $t_b = 0.04 \mu\text{m}$ の曲線上にほぼのっている。またひまし油については、吸着油膜厚さに表面性状係数依存性が認められ⁽²⁸⁾、表面性状係数 K の増加に伴って吸着油膜厚さの減少傾向が認められる。 n -デカンに脂肪酸を添加すると潤滑性能が若干改善される。

さて図13の実験結果と計算結果の比較から吸着油膜厚さ t_b を推定し、前章で求めた吸着油膜厚さ比 T_b との相関を求めることにより、接触電気抵抗が境界潤滑状態において有する意義を吟味する。吸着油膜厚さ t_b と吸着油膜厚さ比 T_b の相関を図14に示す。ただし、ひまし油で潤滑した場合には、 t_b に表面性状係数依存性が認められたので、4種類のしゅう動面すべての実験結果が示してある。図より明らかなように、両

図13 静摩擦係数と表面性状の関係

図14 吸着油膜厚さと吸着油膜厚さ比の関係

図 15 吸着油膜厚さあるいは吸着油膜厚さ比と添加脂肪酸の炭素数の関係

図 16 接触面積の比較

者の間には強い相関が認められ(相関係数0.78), T_b が大きい潤滑油ほど t_b も大きくなっている。これは、境界潤滑状態における潤滑油の性能が表面に吸着した油膜の厚さにより説明しうることを意味するとともに、接触する2面間の接触電気抵抗を調べることによって潤滑油の性能を評価しうることを意味している。

図15は、基油であるn-デカンに添加した脂肪酸の炭素数 n と、 T_b あるいは t_b の関係を示したものである。図中の $n=0$ の実験点は、脂肪酸を添加していないn-デカンのみで潤滑した場合のものである。脂肪酸を添加することにより、潤滑油の性能が改善されている。

次に、図15により添加した脂肪酸の炭素数との関連を検討してみる。n-デカンと炭素数が同じであるかあるいはそれ以上である脂肪酸を添加すると、吸着油膜厚さ t_b がかなり大きくなる。一方、吸着油膜厚さ比 T_b は脂肪酸の添加により大きくなるが、添加される脂肪酸の種類にはそれほど関係しないようである。

5. 結 論

接触電気抵抗法により、境界潤滑条件下での接触状

態をどの程度把握しうるかをモデル接触部に関する実験から検討するとともに、表面粗さのある実際の接触面での境界潤滑状態と接触電気抵抗法により推定した接触状態がどのような関係にあるかを検討した。

その結果、接触電気抵抗の測定結果から直接接触状態を定める重要な因子である吸着油膜厚さそのものを見積もることは困難であるが、これと密接な関連のある吸着油膜厚さ比が容易に求められること；この吸着油膜厚さ比は、粗さのある実際の接触面に吸着した油膜の厚さによく対応しており、吸着油膜厚さ比ひいては接触電気抵抗法により潤滑油の性能を評価しうることを明らかにした。

付 録

吸着油膜接触部の面積と金属接触面積の比較；試験片平面Tと鋼球Sが吸着油膜を介して接触しているときの吸着油膜接触部の面積 A_b と金属接触面積 A_m を式(6)により計算した一例を図16に示す。計算に使用したパラメータは図中に示してある。吸着油膜の厚さ t_b は、実際の潤滑油に対して推定される値⁽²⁰⁾ に比べて十分大きく仮定し、 $t_b=1\mu\text{m}$ としてある。しかしながら、垂直荷重 Q の大きさにかかわらず A_b の値は A_m の $1/10^3 \sim 1/10^4$ 程度であり、 A_m に対して A_b を無視してさしつかえないことがわかる。

文 献

- (1) Holm, R., *Electric Contacts*, (1946), 1, Almquist and Wiksells.
- (2) 松山・鈴木, 機論, 21-106(1955), 450.
- (3) 松山・鈴木, 機論, 24-146(1958), 692.
- (4) 松永, 潤滑, 18-4(1973), 252.
- (5) 松永, 潤滑, 25-12(1980), 792.
- (6) Bowden, F. P. and Tabor, D., *The Friction and Lubrication of Solids*, (1950), 25, Oxford University Press.
- (7) 玉井, 潤滑, 2-3(1957), 115.
- (8) 久門, 潤滑, 21-12(1976), 824.
- (9) Wilson, R. W., *Proc. Phys. Soc.*, B, 68-9(1955), 625.
- (10) Cocks, M., *Proc. Phys. Soc.*, B, 67-3(1954), 238.
- (11) Keller, Jr., D. V., *J. Vax. Sci. and Tech.* 9-1(1972), 133.
- (12) Furey, M. J., *ASLE Trans.*, 4-1(1961), 1.
- (13) 三由, 潤滑, 21-8(1976), 527.
- (14) 宮川, 機論, 29-199(1963), 563.
- (15) 宮川, 機論, 29-199(1963), 572.
- (16) 河野・ほか2名, 潤滑, 32-4(1987), 255.
- (17) Czichos, C., ほか2名, *Wear*, 40(1976), 265.
- (18) 菅野, 岡部, 潤滑, 26-1(1981), 56.
- (19) 川村, 潤滑, 24-6(1979), 331.
- (20) 加藤・ほか3名, 機論, 50-451, C(1984), 546.
- (21) 加藤・ほか3名, 文献(20)の554ページ.
- (22) Smith, A. J. and Cameron, A., *Proc. R. Soc. Lond. A*, 328(1972), 541.
- (23) Brailsford, J. R., *Wear*, 25(1973), 85.

- (24) 杉田, 潤滑, 18-1(1973), 24.
 - (25) Wang, S. S., ほか 3 名, *ASLE Trans.*, 30-3(1987), 394.
 - (26) 加藤・丸井, 機誌, 83-742(1980), 1166.
 - (27) 加藤・ほか 2 名, 機論, 37-299(1971), 1427.
 - (28) 丸井・ほか 2 名, 機論, 54-508, C(1988), 3065.
-