純銅の空气中フレッチング摩擦における酸素と 水蒸気の吸着効果[†]

芦田 実* 後藤 穂積**

Effects of Oxygen and Water Vapor Adsorption on Friction of Pure Copper during Fretting

by

Minoru ASHIDA* and Hozumi GOTO**

Fretting friction experiments for pure copper in contact with itself were carried out in air and in argon. Variation in coefficient of friction μ was continuously measured before and after the rapid change in relative humidity RH from 0 % to the desired RH levels, namely RH jump.

The μ in air at a steady state just after the RH jump increased with jump range ΔRH from the minimum value of $\Delta RH = 0$ %. The μ in argon was quite higher than that in air but less changed with ΔRH . The physical conditions of rubbing surfaces can be kept constant even after the RH jump in air because of the short testing time. Therefore, the μ in air is affected only by the variation in surface functional group of the rubbing surfaces. The increase in μ with ΔRH can be explained by an adsorption model of oxygen and water molecules on the rubbing surfaces.

Variation in μ during fretting without RH jump was also measured at various RH levels. The steady μ in air changed complicatedly against RH and was smaller than the μ with RH jump. Roughness of the rubbing surfaces was varied with RH . Therefore, the variation in physical factors affecting μ should be taken into consideration in the fretting experiments at RH levels without RH jump.

Key words : Effect of adsorption, Oxygen and water vapor, Friction, Fretting test, Pure copper

1 緒 言

大気中で稼働する機械部品の結合部には、微小な相対すべりの繰返しによってフレッチング摩擦がしばしば発生する。この表面損傷は化学的・機械的破損過程を含むので、大気中の各成分、とくに酸素と水蒸気の影響を受けやすい。例えば、湿度を変数とした純金属の大気中フレッチング実験では、乾燥状態から湿度の増加とともに摩擦量は増大し、ある湿度で摩擦量の極大値が現れる。それ以上の湿度になると逆に摩擦量が減少し、高湿度レベルでは乾燥空気中よりも摩擦量が小さくなる^{1)~3)}ことがある。

一般に空気中の摩擦・摩擦実験では、各湿度レベルで気体の吸着・酸化などの摩擦面の化学的状態が異なるとともに、摩擦面の表面あらし、加工硬化^{4)~6)}、摩擦粉の発生や摩擦面内での挙動^{7),8)}などの物理的状態も変化するものと考えられる。これらの因子が互いに重畳して摩擦係数や摩擦率に影響を及ぼすので、湿度効果のみを単独に取り出して調べることは非常に難しい。したがって、フレッチング摩擦量の極大値が出現する理由

は現在でも十分には解明されていない。

機械的活性化^{12),13)}の効果によって摩擦面の原子配列に動的なひずみが生じたり、摩擦面の温度が瞬間的に上昇¹⁴⁾したりして、摩擦・摩擦実験中には摩擦面が化学的に活性化する。機械的および化学的活性化は主として摩擦・摩擦実験中に起こるので、実験終了後の摩擦面を用いてそれらの効果を調べることはできない。さらに、実験中には2つの試験片が接触しているため、この接触部分における化学反応を直接測定することも困難である。

そこで本研究では純銅を用いて次のような2段階実験を行った。まず、相対湿度 $RH=0\%$ の大気中とアルゴンガス中において一定のフレッチング条件下で摩擦実験を行い、ついで RH を 0 % から ΔRH だけ急激に変化させ、この“ RH ジャンプ”に追従する摩擦係数（以下、 μ という）の変化を接触面の物理的状態が変化しない間に短時間で測定した。このような2段階実験を多数回行ったが、第1段階では表面あらしなどの物理的状態と μ がほぼ等しい摩擦面が常に得ら

† 原稿受理 平成2年12月10日 Received Dec. 10, 1990

* 埼玉大学教育学部 浦和市下大久保, Faculty of Education, Saitama University, Shimo-ohkubo, Urawa

** 正会員 福岡工業大学 福岡市東区和白東, Fukuoka Institute of Technology, Wajiro-higashi, Higashi-ku, Fukuoka

れた。この実験方法によって、 μ に及ぼす物理的効果をできる限り除去し、摩擦に及ぼす湿度効果のみを μ の変化として間接的に測定できた。 RH ジャンプ後に、 μ が定常状態に到達したときの μ 値と ΔRH との間の関係を求めた。この関係を摩擦面への大気中の酸素分子と水分子の吸着に基づいて考察した。

2 実験装置および方法

2・1 供試材、摩擦実験装置および測定方法

供試材は純度 99.9% 以上の銅であり、そのビッカース硬さは $Hv=110$ (測定荷重 4.9 N, 負荷時間 30 s) である。素材購入後なら熱処理を施さず、機械加工で試験片を製作し、#1200 のエメリー紙で表面仕上げを施した。試験片の形状は外径 20 mm, 内径 16 mm, 長さ 24 mm の円筒である。試験片をアセトン中で超音波洗浄した後、実験に供した。

使用したフレッチング摩擦実験装置を Fig. 1 に示す。試験片の接触様式は 2 円筒の外周面同士を軸直交で接触させる方式である。シェンク形疲労試験機の駆動装置から与えられる往復繰返し円弧運動によって、駆動側試験片 ⑮ とこれに接触する従動側試験片 ⑤ の間に微小な相対すべりが生じる。おもりに ⑭ で接触荷重 P が加えられる。ひずみゲージ ⑧ でフレッチングに伴う摩擦波形を測定し、その片振幅を P で除して μ に換算した。また高分子薄膜の静電容量変化に基づく湿度・温度センサ ⑬ でふん囲気箱 ② 中の RH と温

度を測定した。 RH の測定範囲は 0 ~ 80% (精度 $\pm 2\%$) であり、 RH の瞬間的な変化に対する応答速度は約 5 s (90% 応答) である。渦電流式非接触変位センサ ③ で従動側試験片の変位波形を測定し、また静電容量式非接触変位センサ ⑪ で駆動側試験片の変位波形を偏心円板式駆動装置のアーム部 (ふん囲気箱の外にある) の位置で測定した。

実験中の種々のアナログ測定値は A/D 変換器 (分解能 12bit, A/D サンプリグ周期 500 Hz/CH) を通してデジタル化され、パーソナルコンピュータで処理された。

2・2 環境制御および実験条件

空気中の実験では、ガスドライヤで作った乾燥空気 (絶対湿度は体積基準で 100 ppm 以下) またはあらかじめ RH を制御した湿り空気をふん囲気箱 (約 12 ℓ) 内に送り込み、ふん囲気箱内の RH を設定値の $\pm 2\%$ 以内に保った。アルゴンガス中の実験では、乾燥アルゴンガス (純度 99.99%) および水中に泡状に吹き込ませた湿りアルゴンガスを混合して RH を制御した。

フレッチング運動の周波数は 9.62 Hz, 駆動側試験片の変位片振幅は 140 μm , 接触荷重は $P=28.9\text{ N}$ および 14.6 N, ふん囲気の温度は $33\pm 1^\circ\text{C}$ である。

2・3 摩擦実験の手順

まず第 1 段階のフレッチング摩擦実験として、 $RH=0\%$, $P=28.9\text{ N}$ で繰返し数 $n_f=6.9\times 10^4$ 回 (実験時間 2 hr) のフレッチングを与え、 $\mu=0.78\pm 0.07$ (空気中), 中心線平均あらさ $R_a=1.5\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$ (空気中) の摩擦面を得た。続いて第 2 段階の実験として、1 min 以内に RH ジャンプさせて、この前後の μ , 従動・駆動側試験片間の相対すべりおよび RH の時間的な変化を 10~15 min 間測定した (Fig. 4, 5, 7 参照)。この後実験を停止し、 RH を再び 0% に戻した。

つぎに前の実験と同一場所の摩擦面を用いて、別の第 1 段階実験として、 $RH=0\%$ のまま $n_f=1.7\times 10^4$ 回摩擦した後、 RH ジャンプさせた。このような 2 段階摩擦実験を同一接触位置の摩擦面を用いて複数回繰返して行った。この実験方法では、摩耗粉の発生とその摩擦面内での挙動を除いて、 RH ジャンプ後の物理的状態をほぼ一定に保ち得る。また、摩擦実験中に見かけの接触面積 A_a は少しずつ増加するが、この効果による μ の変化はほとんど無視できる。なお、空気中における実験終了時の A_a は $7.5\pm 1.0\text{ mm}^2$ であった。さらに試験片の新しい接触位置で同様な実験を複数回行ったが、これによる μ のばらつきもほとんど見られなかった。

3 実験結果

3・1 摩擦係数波形と相対すべり波形

空気中のフレッチング実験中に測定された μ 波形

Fig. 1. Fretting apparatus. ① fan, ② environmental chamber, ③ displacement sensor, ④ aluminum plate, ⑤ driven specimen, ⑥ bar for fixing the driven specimen, ⑦ leaf spring, ⑧ strain gage, ⑨ plate for supporting the driven specimen, ⑩ driving arm, ⑪ displacement sensor, ⑫ coil spring, ⑬ sensors for relative humidity and temperature, ⑭ dead weight, ⑮ driving specimen, ⑯ gas inlet.

Fig. 2. Wave forms of relative slip a and coefficient of friction μ before (a) and after (b) RH jump. Range of relative humidity jump $\Delta RH = 14\%$, contact load $P = 28.9$ N, frequency of fretting motion $f = 9.6$ Hz, half amplitude of fretting for driving specimen $140 \mu\text{m}$.

と両試験片間の相対すべり波形（S 波形，変位計③と⑪で測定した変位波形から合成した）について，RH ジャンプ前の例を Fig. 2(a) に，RH ジャンプ後の例を Fig. 2(b) に示す。この図では RH ジャンプの幅は $\Delta RH = 14\%$ ($0\% \rightarrow 14\%$) である。なお，駆動側試験片の変位波形は図示されていないが，正弦波状であり，RH ジャンプの前後でその形状や振幅は変化していない。 μ 波形は，両試験片の接触部が固着しているために時間に対して急激に正弦波状に変化する部分と巨視的すべりが生じているため時間に対してあまり変動しない部分とを順次つなぎ合わせた波形となっている。S 波形については，フレッチング実験装置をバネ系に置換えて振動解析を行った結果，駆動側試験片の変位波形（正弦波）から従動側試験片の変位波形（ μ 波形と形が類似¹⁶⁾）を差引いたものであるから，正弦波ではない。

Fig. 3(a), (b) は Fig. 2 のデータから描いた 2 サイクル間の μ -S 線図であり，2 サイクルとも同じルートを通っている。左右の傾きの大きい直線部分では両試

Fig. 3. Relationship between μ and relative slip a before (a) and after (b) RH jump. The variables are the same as those in Fig. 2.

験片の接触部が固着している。また，上下の傾きの小さい直線部分では巨視的すべりが生じており，すべりの開始時よりも終了時に μ 値が大きくなっている。RH ジャンプの前後の測定値を比較すると， μ は RH ジャンプ後のほうが大きくなっている。以後の各図中における μ 値としては，ピーク-ピーク値を求め，この 1/2 の値（片振幅）を用いた。

3・2 RH ジャンプに伴う摩擦係数の挙動

空気中における RH ジャンプに伴う μ の時間的変化の例を Fig. 4, 5 に示す。両図とも RH は 1 min 以内で所定の値に到達している。Fig. 4 は $\Delta RH = 14\%$ の場合 (Fig. 2) であり， μ の変化開始時間は RH の変化開始時間より 45 sec 程度の遅れがある。この遅れは主として，すべり接触している摩擦面の狭い空間を水分子が拡散する時間であろう。 μ は増加を開始してから約 3 min 後に定常値に到達している。Fig. 5 は $\Delta RH = 59\%$ の場合である。 μ が変化している時間は約 1 min であり，この場合にも μ の変化開始時間には RH の変化開始時間よりわずかに遅れがある。 ΔRH が大きいほうが水分子の拡散速度が大きいので，Fig. 5 の μ 変化曲線のほうが Fig. 4 の場合よりも時間的に早く定常値に到達している。

Fig. 6 は，RH ジャンプ後その ΔRH 値に保ちながらフレッチング摩擦実験を数 hr 続けた場合の μ の変化を示している。 μ は漸減して，RH ジャンプなしで

Fig. 4. Time-dependent change of μ associated with an RH jump of 14% in air. The arrows in this figure indicate the testing time corresponding to the waves in Fig. 2.

Fig. 5. Time-dependent change of μ associated with an RH jump of 59% in air.

最初から所定の RH で実験した場合の μ 値に近づいていくことを確認した。この漸減は次のような表面官能基 M-OH の生成反応（水分子の化学吸着）によって説明できる。（官能基とは化学的性質の原因となっている原子団のことであり、ここでは M-OH, M=O

Fig. 6. Time-dependent change of μ for several hours after an RH jump of 49% in air.

などをさす.)

乾燥空気中以外の湿り空気中における RH ジャンプ無しの摩擦面では OH 基は常に存在する。一方, RH ジャンプ実験の第 1 段階 ($\Delta RH=0\%$) では OH 基はほとんど存在しない。上式の反応速度は後述の式 (2), (3) の吸着速度と比較するとかなり遅く, 突起の新生面上では物理吸着した水分子が突起同士の真実接触によって容易に除去されるので, OH 基が生成し難いと考えられる。したがって, RH ジャンプ後にこの反応が起こる摩擦面上の場所は, しばらくの間接触が起こらない場所, すなわち摩耗によって微小突起が脱落した跡であろう。この位置に突起が再生し, 再び直接接触が起るまでの時間に OH 基や含水酸化膜が生成する。再生した突起表面上の化学吸着による OH 基は物理吸着水よりも真実接触によって除去され難いので, 次第に突起表面上の OH 基の存在率が増加し, これに伴って摩擦面の物理的状態なども変化する。かくして RH ジャンプ後に, μ 値が RH 一定の実験で得られる測定値に近づいていくと考えられる。

Fig. 7 は同一接触面を用いて 2 段階摩擦実験を数回繰返した場合における μ の変化の例を示している。まず, $\Delta RH=14\%$ で μ 値を測定した後, 実験装置を停止して RH を 0% に戻した。ついでフレッチングを再開し, $\Delta RH=44\%$ の実験を行った。再び実験装

Fig. 7. Example of sequence of two-step fretting friction experiments.

置を停止して RH を 0% に戻し、最後に $\Delta RH = 59\%$ の実験を行った。 μ はこのような実験順序によく対応して変化し、 RH を 0% に戻したときの μ 値は 0.78 ± 0.07 の範囲にあり、また、 RH ジャンプをさせると μ が急増していることがわかる。

3.3 RH ジャンプ後の μ と ΔRH との関係

空気中およびアルゴンガス中における RH ジャンプ後の μ の定常値と ΔRH との関係を Fig. 8 に示す。実験値に付記した縦線の幅は μ の最大値と最小値のばらつき範囲を表す。 RH ジャンプ前の μ 値はすべて平均して、 $\Delta RH = 0\%$ の位置にプロットした。空気中の μ 値は $\Delta RH = 0\%$ で最も小さく、 ΔRH の増加とともに増加し、 $\Delta RH \geq 40\%$ で飽和している。比較のために、空気中において実験開始から終了まで所定の RH レベルでフレッチング摩擦（繰返し数 $n_f = 9.8 \times 10^4$ 回）を行ったときの μ 値 ($n_f = 8.7 \times 10^4 \sim 9.8 \times 10^4$ 回の間の平均値) も示している。 RH ジャンプ無しの場合には各実験値のばらつき範囲が小さい。 μ 値は RH に対して複雑に変化し、 μ の極大値、極小値が現れている。一方、アルゴンガス中における RH ジャンプ後の μ 値は空気中よりもかなり大きい。ばらつき範囲が大きいので、 ΔRH に対する μ の変化傾向は明らかでなく、ほぼ一定と考えるべきであろう。

空気中の RH ジャンプ実験において、 $\Delta RH = 0\%$ では純銅の摩擦面に対して空気中酸素の解離吸着のみが起る。^{4), 17)} $\Delta RH = 0\%$ でアルゴンガス中と空気中の μ 値を比較して明らかのように、酸素の吸着膜（または

Fig. 8. Variations in steady μ with ΔRH at $P = 28.9\text{ N}$ in air and in argon.

酸化膜) は真実接触点の凝着を妨げ、 μ を減少させる効果がある。一般に気体の平滑表面への物理吸着速度は化学吸着速度よりも極めて大きい。¹⁸⁾ 本実験の場合にも、酸素の化学吸着速度よりも水の物理吸着速度のほうが大きい¹⁹⁾ので、 ΔRH の増加とともに摩擦面上への空気中水分子の吸着量が増加し、酸素の吸着量が減少する。また、アルゴンガス中のフレッチング摩擦実験から明らかなように、水の物理吸着膜は μ 値を変化させる効果をあまり有していない。したがって空気中の RH ジャンプ実験では、Fig. 8 に見られるように、 ΔRH の増加にともなう酸素吸着量の減少によって μ は増加する。

RH ジャンプ無しの実験では R_a は RH の増加とともに $1.5\text{ }\mu\text{m}$ の値から減少し、 $RH \geq 20\%$ では $0.9\text{ }\mu\text{m}$ 程度となった。さらに、各 RH 域で摩擦面の化学的状态も複雑に変化するであろう。これらの因子が相互作用した結果、Fig. 8 に見られるように、低 RH 域では水分子の吸着量の増加のため μ が増加して極大値を示す。³⁾ 中 RH 域では多量の摩擦粉の転動作用で摩擦面どうしが凝着的な接触をする確率が減少して μ が減少する。高 RH 域では接触面からの摩擦粉の排出が促進されて再び摩擦面どうしが凝着的な接触をする確率が増加して μ が増加したのである。このように RH ジャンプ無しの実験では μ に影響を及ぼす

Fig. 9. Variation in steady μ with ΔRH at $P=14.6\text{N}$ in air.

因子が多すぎる。ゆえに、 RH の化学的效果に関するより深い考察を行うためには、本報告で提案する影響因子の少ない実験方法が必要となる。

Fig. 9 に接触荷重を $P=14.6\text{N}$ にした場合の RH ジャンプ後の μ と ΔRH の関係を示す。 μ - ΔRH 曲線には Fig. 8 の $P=28.9\text{N}$ の場合と同様な傾向が認められる。 μ に及ぼす P の効果を比較すると、 μ の値は P の小さいほうがやや大きい。

4 考 察

Fig. 8, 9 の RH ジャンプ後の μ - ΔRH 曲線は、ラングミュア型の吸着等温線と類似した曲線である。これらの図で RH ジャンプに伴う μ の変化量 $\Delta\mu = \mu - \mu_0$ (μ_0 は $RH=0\%$ における摩擦係数) が摩擦に及ぼす ΔRH の化学的效果である。前報⁴⁾のピン-ディスク形摩擦実験において低炭素鋼の摩耗率と P の関係を考察する場合に、摩擦面の凝着摩耗が起こり得る確率 $F_w (=F_p F_d f(\theta))$ を提案した。ここで F_p および F_d はそれぞれピンおよびディスク摩擦面の突起上に酸化膜が存在しない確率、 $f(\theta)$ は吸着なしに突起新生面同士が直接接触する確率である。考察する物理量が摩耗率と摩擦係数の違いはあるが、本報告における純銅のフレッチング摩擦実験でも F_w と同様な確率を考えてみる。フレッチング実験ではピン-ディスク形実験と比較して試験片の接触様式が異なり、いつも同じ場所が接触しているので、 $F_d = F_p$ とする。さらに Fig. 6 から考えて、 RH ジャンプ後の短い時間内に F_p が ΔRH の影響で変化するとは考え難いので、本実験条件では $F_p = \text{一定}$ と仮定する。ゆえに以後、 ΔRH による $f(\theta)$ の変化のみを考察する。

さて、摩擦面への空気中の酸素分子 O_2 と水分子 H_2O の競争吸着を考える。

式 (2) の反応は純銅の新生面 M への O_2 の解離吸着を表す。このときの吸着の速度定数を k とする。吸着した酸素の脱離の活性化エネルギーは非常に大きいので、脱離反応を無視する。式 (3) の反応は M への H_2O の物理吸着を表し、この式の正・逆方向の反応速度は式 (2) の反応速度よりも非常に大きく、常に化学平衡の状態にあると仮定する。 ($d\theta_3/dt=0$)。 K をこの式の平衡定数とすると、

$$K = \theta_3 / (\theta_1 RH) \quad (4)$$

ここで、 θ_1 は M が摩擦面上に露出している比率、 θ_3 は H_2O の表面吸着率である。空気中の酸素分圧を p_0 、酸素原子の表面吸着率を θ_2 とすると、式 (2) の反応速度式は

$$-d\theta_2/dt = d\theta_1/dt = -2kp_0\theta_1^2 \quad (5)$$

また、 $\theta_1 \sim \theta_3$ には次式の関係がある。

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 1 \quad (6)$$

初期条件として、 $t=0$ 、すなわち摩擦面のある突起に新生面が生じたとき、

$$\theta_{10} = 1/(1+KRH), \quad \theta_{20} = 0,$$

$$\theta_{30} = KRH/(1+KRH) \quad (7)$$

を用いて、式 (5) を積分し、突起の平均自由時間 $t=\Delta\tau$ 後の $\theta_1 \sim \theta_3$ および $f(\theta)$ を求める。

$$\theta_1 = 1/(1+2kp_0\Delta\tau + KRH) \quad (8)$$

$$\theta_2 = 2kp_0\Delta\tau/(1+2kp_0\Delta\tau + KRH) \quad (9)$$

$$\theta_3 = KRH/(1+2kp_0\Delta\tau + KRH) \quad (10)$$

$$f(\theta) = (\theta_1 + \theta_3)^2 = (1+KRH)^2/(1+2kp_0\Delta\tau + KRH)^2 \quad (11)$$

RH ジャンプ後では、 $\theta_1 \sim \theta_3$ の値の大小関係は $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$ (すなわち、 $1 < 2kp_0\Delta\tau < KRH$) と考えられるので、この条件を用いて式 (11) を近似する。

$$f(\theta) \approx KRH/(4kp_0\Delta\tau + KRH) \quad (12)$$

$RH=0\%$ の場合にも同様に $\theta_1 < \theta_2$ より $f(\theta) \approx 0$ と考えられるので、式 (12) の RH を ΔRH で置き換えることによって、 ΔRH に対する $f(\theta)$ の変化量 $\Delta f(\theta)$ が求まる。 $\Delta\mu$ はこの $\Delta f(\theta)$ に比例するものと考えられる。

$$\Delta\mu \propto K\Delta RH/(4kp_0\Delta\tau + K\Delta RH) \quad (13)$$

さらに、式 (13) 中の $\Delta\tau$ は次式で表わされる。

$$\Delta\tau = (\pi R_j/2v)(A_a H_v/P)^{1/2} - \pi R_j/v \quad (14)$$

ここで、 R_j は 1 つの真実接触点の半径、 v はすべり速度の平均値である。本実験条件では、 P が増加すれば A_a および H_v も増加して、 $A_a H_v/P$ がほぼ一定になることが確認されており、 $\Delta\tau$ は一定値と考えてよい。そこで、 $\Delta\mu$ の逆数をとって式 (13) を簡単にすると、

$$\Delta\mu^{-1} = C_1 \Delta RH^{-1} + C_2 \quad (15)$$

Fig. 10. Relationship between $\Delta\mu^{-1}$ and ΔRH^{-1} .

ここで C_1 および C_2 は定数である。

上式に基づいて縦軸を $\Delta\mu^{-1}$ に横軸を ΔRH^{-1} にとって、Fig. 8, 9 のデータを描きなおした結果を Fig. 10 に示す。図中の実験値はほぼ1本の直線上にのっているの、本実験における $\Delta\mu$ の ΔRH による挙動は上述の O_2 および H_2O の吸着メカニズムで説明することができる。なお、Fig. 8, 9 中の曲線は Fig. 10 の直線に基づいて描かれた曲線である。これらの図からも明らかなように $\Delta\mu$ は P に依存しない。しかし、 μ_0 は P によって変化している。

5 結 言

純銅対純銅のフレッチング摩擦に及ぼす空气中相対湿度 RH の化学的效果を次のような2段階実験により測定した。まず一定のフレッチング条件で $RH=0\%$ の実験を行い、接触面の物理的状態がいつも同じ程度で、摩擦係数 μ が等しい摩擦面を作り、次に RH を 0% から種々の ΔRH に急激に増加させて、この RH ジャンプに追従する μ の変化を摩擦面の物理的状態が変化する前に短時間で測定した。得られた結果をまとめると、

(1) 空気中の μ 値は $\Delta RH=0\%$ で最も小さく、 ΔRH とともに増加し、ある ΔRH 以上で飽和する。一方、アルゴンガス中の μ 値は ΔRH に依らずほぼ一定である。水の物理吸着膜には μ 値を直接変化させる効果はあまりないが、酸素吸着量を変化させる。

その結果として μ 値に影響を及ぼす。

(2) ジャンプ幅 ΔRH に伴う μ の増加幅 $\Delta\mu$ は、新生面への酸素分子の解離を伴う化学吸着および水分子の物理吸着・脱離の化学平衡に基づいたメカニズムによって説明できる。

参 考 文 献

- 1) R. C. Bill, NASA TM-78972 (1978).
- 2) H. Goto and D. H. Buckley, NASA TP-2403 (1984).
- 3) H. Goto and D. H. Buckley, Tribology International, **18**, 237 (1985).
- 4) 芦田 実, 後藤穂積, 材料, **39**, 1398 (1990).
- 5) 三科博司, 潤滑, **32**, 886 (1987).
- 6) 三井田勝久, 大平五郎, 潤滑, **24**, 807 (1979).
- 7) N. C. Welsh, Phil. Trans. Roy. Soc., London, **257**, A-1077, 31 (1965).
- 8) J. K. Lancaster, Proc. Roy. Soc., Ser. A, **273**, 466 (1963).
- 9) 笹田 直, 野呂瀬進, 志村好男, 諸橋 博, 潤滑, **20**, 712 (1975).
- 10) 笹田 直, 野呂瀬進, 外丸雅美, 三科博司, 潤滑, **23**, 519 (1978).
- 11) 三井田勝久, 大平五郎, 潤滑, **24**, 753 (1979).
- 12) H. Goto, M. Ashida and Y. Terauchi, Wear, **94**, 13 (1984).
- 13) H. Goto, M. Ashida and Y. Terauchi, Wear, **110**, 169 (1986).
- 14) F. P. Bowden and D. Tabor, "The Friction and Lubrication of Solids", Clarendon Press, Oxford (1954).
- 15) H. Goto and M. Ashida, Tribology International, **21**, 183 (1988).
- 16) 遠藤吉郎, 後藤穂積, 福永年宏, 日本機械学会論文集, **39**, 2195 (1973).
- 17) F. H. P. M. Habraken and G. A. Bootsman, Surface Science, **87**, 333 (1979).
- 18) 慶伊富長, "吸着", p. 50 (1965) 共立出版
- 19) K. Bange, D. E. Grider, T. E. Madey and J. K. Sass, Surface Science, **136**, 38 (1984).