金属の乾燥摩擦におよぼす湿度の影響*

里 吉 超** 葉 山 房 夫***

Masaru Satoyoshi and Fusao Hayama: Effects of Humidity on the Dry Friction of Metals. An experimental study has been made of the effects of humidity on the dry friction of metals. The sliding friction test was carried out in the atmosphere of a constant temperature (30°C) and a constant humidity (dry and relative humidity 80%).

Wear of iron slid against a hardened bearing steel ring under a load of 1 kg decreased sharply, when water vapour was contained in the atmosphere, particularly at a lower sliding speed. However, at a higher sliding speed (4 m/sec), no difference was observed in the wear of iron between the cases slid in dry atmosphere and in humid one. Wear of iron at 1 m/sec decreased with increasing water vapour pressure in the atmosphere.

Wear of 70/30 brass decreased in the presence of water vapour at a lower sliding speed, as in the case of iron.

However, in the case of leaded 60/40 brass which showed a severe wear, the presence of water vapour increased the friction and wear.

It was observed that in the friction of iron or 70/30 brass, fine wear debris cohered together and adhered to the frictional surface, and the presence of water vapour accelerated the cohesion and adhesion of wear debris to the surface. It is suggested that the fine wear debris (oxides) adhered to the metal surfaces protects the surfaces from metallic adhesion and reduces the wear.

A large wear debris was formed in the case of leaded 60/40 brass, and it appears that the adhesion of wear debris to the sliding surface increased by water vapour causes an increase of friction and wear.

(Received March 31, 1969)

I. 緒 言

従来、乾燥摩擦の実験は特別の場合をのぞいて大気中室温で行なわれている。ところで大気温度ならびに湿度はたえず変化しており、一定の摩擦雰囲気が保持されることはまれである。このような雰囲気の変化が摩擦ならびに摩擦に影響を与えることは十分考えられるし、事実、高温多湿である夏と低温低湿度の冬とは、同一条件における金属の摩擦に相当の差が認められる場合がある。湿度すなわち大気中に含まれる水蒸気量が摩擦におよぼす影響について、従来いくつかの研究⁽¹⁾⁽²⁾がある。Bowden ら⁽¹⁾は、水蒸気が存在すると、物体の接触点のところに局部的なメニスカスを形成し凝着力が生ずることを述べている。また水蒸気が新鮮な金属同志の高い摩擦を低下させること⁽³⁾、あるいは材料の組合せによつては摩擦におよぼす水蒸気の影響が異なること⁽⁴⁾などが報告されている。しかし水蒸気が金属の摩擦におよぼす影響についての研究は少ない。そこで、金属の摩擦および摩擦現象に水蒸気がいかなる影響を与えるか実験的に明らかにするため、ここでは雰囲気温度を一定とし、水蒸気含量を調節した条件で摩擦を試みた。

II. 試 料 お よ び 実 験

摩擦試料として、乾燥摩擦では従来比較的多くの実験が試みられている鉄および黄銅⁽⁵⁾⁽⁶⁾を選択した。本実験では電磁用純鉄(C 0.03, Si 0.07, Mn 0.02, P 0.019, S 0.011 (wt%))丸棒、70/30 黄銅(Cu 68.4, Zn 31.4 (wt%))および鉛含有 60/40 黄銅(Cu 58.5, Zn 37.5, Pb 2.83 (wt%))鋳物を用いた。これらの試料からみかけ接触面積 $5 \times 6 \text{ mm}^2$ の小試片を作製した。摩擦相手は軸受鋼(SUJ 2)で熱処理によりビッカースかたさが約 800 になつていいる 75 mmφ、巾 15 mm のリングである。エメリー紙 02 番で表面研摩したリングの外周に小試片を 1 kg の荷重でおしつけ、リングを回転させることによりすべり摩擦を行なつた。

摩擦部分はプラスチック板で作られた内容積約 6 L の槽内に設けられ、この中に N_2 80 vol%, O_2 20 vol% の割合でボンベガスを毎分約 0.5 L 導入しながら摩擦実験が行なわれた。試験槽内には小型ヘヤードライヤーが置かれ、ヒーターとサーモスタットの作用により恒温($\pm 1^\circ\text{C}$ 以内)ならびに気体の攪拌が可能である。また回転軸と槽壁の間にラビリンスを設け気密の向上を計つている。気体の調湿は水蒸気飽和槽と所定の温度に保持($\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内)されている

** 早稲田大学大学院理工学研究科(Graduate School, Waseda University, Tokyo)

*** 早稲田大学理工学部(Department of Metallurgical Engineering, School of Science and Engineering, Waseda University, Tokyo)

* 1968 年 9 月本会仙台大会にて一部発表

(1) F.P. Bowden and D. Tabor: *The Friction and Lubrication of Solids*, Part I, Clarendon Press, Oxford, (1950), 303.

(2) Ibid, Part II, Clarendon Press, Oxford, (1964), 356.

(3) G.W. Rowe: *Proceedings of the Conference on Lubrication and Wear*, London, (1957), 333.

(4) G. S. Reichenbach: *Lubrication Eng.*, **20**(1964), 409.

(5) 葉山: 精密機械, **21**(1955), 427.

(6) Ibid, **29**(1963), 377.

恒温槽中のコンデンサーに気体を通ずることにより行なわれた。装置の概要を示したのが Fig.1 である。なお試験槽内の空気と調湿した気体との置換には十分注意した。

Fig.1 A schematic diagram of apparatus for friction at various humidity

高すべり速度あるいは高荷重で摩擦を行なうと、摩擦熱による雰囲気温度上昇が、小さい試験槽では無視できなくなるが、本実験装置では冷却設備を持たないので、雰囲気温度の恒温保持が困難になる。そこで雰囲気温度は通常室温よりやや高め、30°C に設定し、荷重 1 kg、最高すべり速度は 4 m/sec とした。試片摩耗量は一定距離すべらせた後の重量減から求めるとともに摩擦力を測定した。実験はすべて 3 回以上行ない、図にはその平均値を示した。また摩擦面ならびに摩耗粉の状態などが湿度の変化によってどう変わるか観察を試みた。

III. 実験結果および考察

1. 鉄の乾燥摩擦におよぼす湿度の影響

摩擦試験槽内の温度を 30°C 一定とし、空気の組成にしたボンベガスを水蒸気飽和槽を通さずに試験槽に導入した場合をここでは便宜上乾燥状態と称することにし、雰囲気が

乾燥状態と相対湿度 80% の場合における鉄の摩擦係数ならびに摩耗量の違いを表わしたのが Fig.2 である。摩擦係数は湿度 80% の場合のほうが乾燥の場合よりやや低い値を示している。低速度ほどその差が大きくなっている。また湿度の違いは摩耗量に明確な相違を生じた。すなわち、乾燥状態では従来から認められている、速度を変えた場合の摩耗量の極大が約 1 m/sec で現われている。一方、湿度 80% の場合にはこのような摩耗量の極大は明確には認められず、摩耗量は 4 m/sec の場合をのぞいて乾燥の場合よりかなり小になつている。

そこで、鉄の摩擦におよぼす湿度の影響が最も顕著に認められた、すべり速度 1 m/sec のもとで水蒸気圧(湿度)と摩耗量の関係を調べたのが Fig.3 である。横軸に雰囲気

Fig.3 Effect of water vapour pressure on wear of iron. sliding speed : 1 m/sec, load : 1 kg

の水蒸気圧をとり、雰囲気温度 20° および 30°C の場合の摩耗量を図示した。20°C の場合、摩耗量は水蒸気圧の増加とともに減少し、相対湿度 100% に相当するところでは著しく低下している。30°C の場合も摩耗量は水蒸気圧の増大とともに減少している。20°C の場合と 30°C の場合の摩耗量を同じ水蒸気圧のところで比較すると、20°C の場合の摩耗量のほうが全体に、30°C における摩耗量よりやや低い値を示している。これらの結果から、鉄の摩擦は雰囲気温度のわずかの違いによつて左右されることが少ないが、雰囲気中の水蒸気量と密接な関係があるといえよう。雰囲気温度 20°C の場合、相対湿度 100% にあたる水蒸気圧のところでの著しい摩耗の低下は摩擦面の観察などから、酸化物の表面への付着が顕著であるため試片面が保護される結果によることが推論された。

摩耗量に大きな差異を認めた、すべり速度 1 m/sec における乾燥状態と高湿度 (30°C, 80%) で得られた摩擦面を Photo.1 に示す。乾燥の場合、試片ならびに焼入軸受鋼の摩擦面は高湿度の場合のものより多少荒れが激しく、摩耗粉の付着は少なくその付着状態は一様ではない。雰囲気に

Fig.2 Effect of humidity on the coefficient of friction (a), and wear of iron (b). load : 1 kg

水蒸気を含む場合には、金属表面そのものの酸化は認め難いが酸化物と考えられる赤褐色摩耗粉が凝集して摩擦面に付着している。とくに焼入軸受鋼表面は、これら付着した摩耗粉によつてほぼ一様な厚さに被覆されている。水蒸気が粉体を凝集させる効果を有することは周知の事実であるが、以上の観察から摩擦においても水蒸気(湿度)が摩耗によつて生ずる粉体相互の凝集ならびに摩擦面への付着を容易にする効果を認め得る。このような水蒸気的作用により凝集した酸化物で表面が厚く覆われた20°C、相対湿度100%の場合の摩擦面を **Photo.2** に掲げる。摩擦面上

dry humid

Photo.1 Appearance of iron riders and mating rings. 1 m/sec

Photo.2 Appearance of iron rider slid at 20°C, humidity of 100%, 1 m/sec, 1 kg

の酸化物は金属間接触を防ぐことにより、摩擦ならびに摩耗に対して有効な場合が多い事実⁽⁷⁾⁽⁸⁾から、Fig.3 に示した水蒸気圧と摩耗量の関係が、高湿度ほど摩耗粉の凝集、付着効果が大になると考えることにより説明できよう。

高すべり速度では、摩擦面への酸化摩耗粉の付着が減少する⁽⁹⁾ため、湿度による摩耗の差異が明確でなくなつたの

であろう。これは、摩擦熱の増大に伴う試片表面の平均温度の上昇を考えると、雰囲気温度が100°C以上では水蒸気量の影響がほとんどなくなるという結果⁽¹⁰⁾と一致している。

2. 70/30 黄銅の乾燥摩擦におよぼす湿度の影響

雰囲気温度30°Cにおける70/30黄銅の摩擦係数ならびに摩耗におよぼす湿度の影響を示したのが **Fig.4** である。鉄の場合に似て、この合金でも雰囲気中の水蒸気が、とくに低すべり速度における摩擦と摩耗を低減している。乾

燥状態では認められる、すべり速度を変えた場合の摩耗量の極大が、湿度80%の場合には消失していることも鉄の場合同様である。この合金の場合も高速度側では湿度の影響が少なくなっている。鉄に比べて、70/30黄銅の摩耗量は少なく摩擦面にはいずれのすべり速度においても、また乾燥状態の摩擦においても、高湿度の場合においても、程度の違いはあるが酸化摩耗粉の形成をみた。 **Photo.3** は0.5 m/secで擦つた場合の試片ならびに相手鋼の表面状態を示すものである。乾燥の場合にも、不均一ではあるが試片面に酸化物が付着しており、焼入軸受鋼表面は、この酸化物により摩擦され金属光沢を呈している。雰囲気中に水蒸気を含む場合には、酸化物は表面に均一に付

Fig.4 Effect of humidity on the coefficient of friction (a), and wear of 70/30 brass (b). load: 1 kg

(7) J.K.Lancaster: Proc. Roy. Soc., **A 273** (1963), 466.
(8) 里吉, 葉山: 金属学会誌, **32** (1968), 1322.

(9) 里吉, 葉山: 金属学会誌, **32** (1968), 11.

(10) E.P.Kingsbury and E.Rabinowicz: ASME Trans., **D 81** (1959), 118.

着しているが、相手鋼表面の損傷は少ない。70/30 黄銅は、本実験条件では摩擦によつて酸化物が形成されやすく、また鉄の場合に比して酸化物の表面への付着性が良好なため、乾燥の場合でも酸化物が脱落せず、部分的に残っているであろう。水蒸気が存在すると鉄の場合と同じようにして、摩擦により生成した酸化物の凝集ならびに付着がさらに促進され、これら酸化物が試片面を覆うことにより、低すべり速度では摩擦量の減少をみるものと考えられる。

dry

humid

Photo.3 Appearance of 70/30 brass riders and mating rings. 0.5 m/sec

3. 鉛含有 60/40 黄銅の乾燥摩擦におよぼす湿度の影響

鉄あるいは 70/30 黄銅の場合と異なり、本合金試片の摩擦量は大きく、水蒸気の影響は摩擦ならびに摩擦を増大させ、とくに低すべり速度 (0.2 m/sec) で摩擦量の増大をき

たした (Fig.5). 摩擦面の観察によると、いずれのすべり速度あるいは雰囲気乾燥、湿潤を問わず、摩擦面の状態に明確な相違を認めなかつた (Photo.4). すなわち、摩擦相手の軸受鋼表面には試片金属が一樣に付着して黄銅の色を呈しており、試片ならびに相手鋼摩擦面における酸化物あるいは表面酸化は顕微鏡下では観察されなかつた。酸化の影響を検討するため、 O_2 あるいは Ar のみを、乾燥あるいは $30^\circ C$, 80% に調湿したなかで摩擦を試みたところ、

$N_2 + O_2$ の場合に類似した結果を得た。すなわち、水蒸気を含んだ O_2 あるいは Ar 中の試片の摩擦は、これらのガスが乾燥している場合のものより大であつて、 $N_2 + O_2$ の場合と同程度の値を示した。このことから鉛含有 60/40 黄銅の摩擦には酸化の影響が少ないといえよう。

4. 水蒸気による摩擦粉の凝集

試片摩擦量が小で、水蒸気が摩擦を低減させた鉄および 70/30 黄銅では、摩擦雰囲気乾燥、湿潤に関係なく、微細な摩擦粉の形成をみた。さらに雰囲気中に水蒸気が多いと摩擦粉の摩擦面への付着が増長されることが示された (Photo.1, 2 および 3). $30^\circ C$, 湿度 80%, 1 m/sec の摩擦条件で鉄試片面に付着した摩擦粉を通常のレプリカ法により採取し電子顕微鏡観察したのが Photo.5(a) である。個々の摩擦粉はほとんどが 1μ 以下の微細なものであつて、微粉が凝集して大きな塊となつてゐることが、その形状から推知される。これら微粉は電子回折の結果、 $\alpha-Fe_2O_3$ から成ることが示された。

ところで、粉体の凝集は主としてつぎの二つによつて起こるといわれている。すなわち、粉体自身の造粒性⁽¹¹⁾ (それ自体で凝集する性質を有し、表面エネルギーの関係で、一般に粉が細かいほど凝集力は増大する) と水蒸気による凝集力⁽¹²⁾ (メニスカスの形成によるもので、その力は水の表面張力と粒子直径の積に比例する) である。

粉体の凝集を考えると微細な摩擦粉が形成される摩擦では、摩擦粉自体で凝集し、あるいは摩擦面に付着するが、さらに雰囲気中に水蒸気が存在すると摩擦粉の凝集ならびに摩擦面への付着が促進され、これら表面付着物がとくに酸化物である場合には、金属接触を減ずることにより、摩擦を減少させることは容易に推察できる。また摩擦粉の凝集ならびに表面付着作用は水蒸気量に比例して大きくなり、Fig.3 に示すような結果が得られたものと考えら

Fig.5 Effect of humidity on the coefficient of friction(a), and wear of leaded 60/40 brass(b). load: 1 kg

(11) H. Rumpf: 化学工学, 26(1962), 905.

(12) M. Corn: J. Air Pollution Control Assoc., 11(1961), 523.

れる。さらに同図に示された同水蒸気圧における 20°C と 30°C の場合の摩耗量の違いは、おそらく、低温ほど水蒸気による摩耗粉の凝集、付着作用が大きくなるためによるのであろう。

試片摩耗量が大で、水蒸気が摩耗の増大をきたした鉛含有 60/40 黄銅では鱗片状の大きな金属摩耗粉を生じた (Photo.5(b))。摩耗粉がかなり大きいため、ここでは摩耗粉自体の凝集は期待できないが、水蒸気による摩耗粉の凝

着が多いほどその量が多いとされている。この結果に基づけば水蒸気が鉛含有黄銅の摩耗を増加させる理由は、一つには水蒸気による摩耗粉の付着効果の増長によることが推論される。

以上のべたことから摩擦によつて形成された摩耗粉の大小によつて水蒸気的作用が違い、またその酸化状態あるいは摩耗機構によつて摩擦におよぼす湿度の影響が異なるといえよう。

dry

humid

IV. 総 括

Photo.4 Appearance of leaded 60/40 brass riders and mating rings. 0.5 m/sec

Photo.5 Appearance of wear debris. 1 m/sec, humidity 80%

集力が大になり、さらに摩耗粉の摩擦面への再付着が促進されよう。Hirstら⁽¹³⁾によると、鉛含有 60/40 黄銅の摩耗は鉛の同位元素をトレーサーに用いた実験から、試片(摩耗粉)が相手面に一定の割合で付着するかたわら、摩耗粉の脱落が起こることにより進行し、摩耗粉の相手面への付

着が多いほどその量が多いとされている。この結果に基づけば水蒸気が鉛含有黄銅の摩耗を増加させる理由は、一つには水蒸気による摩耗粉の付着効果の増長によることが推論される。

金属の乾燥摩擦におよぼす湿度の影響を明らかにするため、恒温、恒湿度(乾燥および相対湿度 80%)ですべり摩擦を行なった。得られた主な結果はつぎのとおりである。

荷重 1 kg で鉄を焼入軸受鋼に対してすべらせた場合の鉄の摩耗量は湿潤雰囲気の場合、とくに低速度では乾燥の場合より小であつたが、高速度の 4 m/sec では乾燥の場合との差は認められなかつた。また 1 m/sec における鉄の摩耗量は湿度の増加とともに減少することが示された。70/30 黄銅の摩耗は鉄の場合同様、低すべり速度において雰囲気中の水蒸気によつて低減された。

試片摩耗量の多い鉛含有 60/40 黄銅では、乾燥の場合に比べ湿潤雰囲気のほうが摩擦ならびに摩耗が大であつた。

鉄および 70/30 黄銅では微細な摩耗粉が凝集して摩擦面に付着するが、水蒸気が存在すると摩耗粉の凝集ならびに摩擦面への付着が促進されることが観察され、これは粉体の造粒性ならびに水蒸気による凝集と関係があることが推論された。表面付着物(酸化物)が金属面を保護するため摩耗が減少する

ものと考えられる。鉛含有 60/40 黄銅では大きな摩耗粉を生じ、水蒸気は摩耗粉の摩擦面への付着を増すが、特異な摩耗機構によつて、摩耗量の増大をみるものと思われる。

(13) W. Hirst and J. K. Lancaster : Proc. Roy. Soc., A 259 (1960), 228.

終りに本実験装置の作成に協力された 早稲田大学 鋳物研究所 職員諸氏ならびに焼入軸受鋼リングを提供された株式会社大矢鋳造に厚く感謝します。