真空中における摩擦摩耗について

内 山 吉 隆*

(昭和44年8月16日受理)

The Friction and Wear in Vacuum

Yoshitaka UCHIYAMA

(Faculty of Technology, Kanazawa University, Kodatsuno-2, Kanazawa-shi)

(Received Aug. 16 1969)

1. 緒 言

摩擦摩耗は複雑な現象であり、種々の因子によって影響を受ける。一般に使用されるブレーキ、軸受、摺動部等は大気中で作動するもので、その特性についてかなり良く知られているが、宇宙空間および真空容器内での摩擦は大気中と異なった挙動を示し、良く知られていない面が多い。

一般に真空中で金属同士を摩擦すると、大気中で作成された酸化膜等がとられた後に金属面間に強い凝着力が働き、高摩擦を示す。さらに真空中で高温加熱して脱ガスをを行なうと清浄な表面が得られ、これらの表面間では著しい凝着がおこる。大気中において、このような金属間の焼け付きを防止するため、潤滑油、グリース、固体潤滑剤等が使用されるが、油、グリース等は蒸気圧が高く真空中では使用出来ない。そのため、蒸気圧が低く、低摩擦を示す固体潤滑剤が真空中の摩擦材料として注目されている。固体潤滑剤である二硫化モリブデン、黒鉛は空気中において良好な潤滑能を有する事が知られている。真空中で、二硫化モリブデン(MoS_2)は良好な潤滑能を示したが、黒鉛は大気中より高摩擦高摩耗率を示し大気存在が摩擦に影響を与える事が知られている。

ここでは、金属、固体潤滑剤 (MoS_2 、黒鉛、四フッ化エチレン樹脂) の真空中における摩擦挙動について、大気中の摩擦と比較して説明を行ない、真空中における摩擦部潤滑の方法について検討を行なう。

2. 真空中における摩擦摩耗挙動

2.1 金属の摩擦

固体表面は、空気中でいかに清浄にしても、酸化物、吸着した不純物等の薄膜でおおわれている。このように

図1 荷重と摩擦係数の関係 (Wilson¹⁾): 空気中
a. すずとすず b. クロムとクロム c. 銅と銅

よごれた膜の厚みは、少なくとも数分子層はあり、摩擦に重要な役割をはたしている。

Wilson¹⁾は、空気中において、すべり面間の摩擦力と接触電気抵抗を荷重の広い範囲で同時に測定した。図1はそれぞれ、すず、クロム、銅同士の摩擦を示したものである。すず同士の場合、摩擦係数は全荷重範囲で一定であり、接触電気抵抗の測定から接触は主として金属接触である事がわかった。クロム板同士の摩擦では、接触電気抵抗は一定であり、金属接触がおこらず、高荷重においても表面酸化膜同士の摩擦である事を示した。さらに銅同士の摩擦においては、軽荷重領域では酸化膜同士の摩擦であり、摩擦係数は小さく滑らかなすべりを示した

* 金沢大学工学部 (金沢市小立野2丁目 40-20)

図2 脱ガス温度と室温における摩擦係数(Bowden and Rowe²⁾), 真空中 ●: ニッケル ○: 白金, △: 銀

が、荷重が増加すると酸化膜が破れ摩擦は高くなり、主として金属接触となった。しかし、接触電気抵抗の測定は、高荷重領域においても完全に酸化物が破壊されていない事を示した。このように、金属では多くの場合空气中で自然に存在する酸化膜だけで金属接触を防ぐに十分であることがわかる。

一方、Bowden と Rowe²⁾ は真空中で摩擦を行ない一定温度で試料を加熱脱ガスした後、室温に冷やして摩擦を行ない、図2のような、室温での摩擦係数と、前処理として行なう脱ガス温度との関係を得ている。各々の金属で異なっているが、金属の蒸発温度に近づくと、さかんな脱ガスをともない、これらの脱ガスによって摩擦が急激に上昇するのがわかった。これは多分、よごれた表面被膜がとれ、表面が非常に清浄なためと考えられる。これらの結果から、金属への吸着物が摩擦を低下させ、清浄面では高摩擦を示すことがわかる。

一般に真空装置では、超高真空を得るため高温加熱による脱ガスを行なうが、これにともなって摩擦面が清浄になり、容易に焼け付きの起る事が理解される。このような高温脱ガスを行なう真空系において焼け付きを防止するため、高温においても十分に安定な潤滑剤が必要となる。

2.2 黒鉛の摩擦摩耗

図3 黒鉛の結晶構造 (Bragg³⁾)

図4 水蒸気圧力と黒鉛の摩擦率との関係(Savage⁴⁾)

黒鉛の結晶構造はX線回折法により図3のように示されている。Bragg³⁾は黒鉛の潤滑作用があるのは、その層間の炭素原子の距離が隣りの炭素原子よりはなれているため、一つの層が自由に他の層をすべる事が出来るためと考えた。このように、黒鉛の低摩擦は黒鉛自体の固有の性質からくるものと考えられたが、Savage⁴⁾が十分に真空中で加熱脱ガスした黒鉛のブラシで実験を行なったところ、高摩擦高摩耗を示した。しかし、高摩擦は低圧のいくつかの蒸気 (H_2O , C_6H_6 , NH_3 等) によって瞬時に低下し、黒鉛の滑らかさは結晶構造によるのではなく、吸着蒸気によるという、いわゆる、蒸気潤滑理論を提案した。そして図4に示すように、水蒸気存在が低摩擦率を示したと報告している。その後Savage⁵⁾等は、種々の気体について摩擦実験を行ない、ごくわずかの蒸気圧力でも潤滑効果を与える事を確めた。図5は、n-pentane 蒸気圧力と、ブラシの摩擦率との関係を調べたものであ

図 5 n-pentane中の黒鉛ブラシの摩耗率 (Savage and Schaefer⁵⁾)

図 6 種々の蒸気中の黒鉛ブラシの摩耗率 (Savage and Schaefer⁵⁾)

図 7 脱ガスした黒鉛結晶間の結合力をあらわすモデル (Deacon and Goodman⁶⁾)

(a) 配向したもの (b) 配向しないもの
(— 強い結合 ; - - - 弱い結合)

り、圧力上昇時の摩耗が零に近づく点を最少潤滑圧力 p_e とした。圧力の低下とともに摩耗率が上昇するのがみられたが、低圧力から圧力を上昇させた時の摩耗率と

図 8 脱ガスした黒鉛の摩擦におよぼす温度の効果 (Rowe⁷⁾) ; 真空中

○ Spectrographically standardised graphite
● Acheson AGR graphite.

図 9 黒鉛の摩擦におよぼす影響 (Rowe⁷⁾)

の間に、ヒステリシスがみられた。各種の蒸気について蒸気圧と摩耗率との関係は図6のように得られている。そして、このような少ない蒸気圧で潤滑されることから、黒鉛の全部の面が蒸気でおおわれるのではなく、表面の活性部分が主に吸着する事によって摩耗率を低下させる事を予期した。この考えは、Deacon⁶⁾等が図7に示すように、脱ガスした先端間の相互作用が大きくなるという考えをもたらし、脱ガスした黒鉛では、図7(b)に示すような多結晶粉末の連結により高摩擦になると説明している。Rowe⁷⁾は、黒鉛におよぼす温度(図8)および雰囲気(図9)の影響について報告している。図8は脱ガスした試料における温度上昇による摩擦の低下を示したもので、黒鉛結晶層内のσ結合強さは温度上昇により影響されないが、結晶層間のπ結合が温度上昇により弱くなる事で説明している。さらに、吸着蒸気による低摩擦の説明として、黒鉛に蒸気が化学吸着する事により、結晶層間の結合を弱め、低摩擦を示すと考えた。

その後、黒鉛の破壊機構と摩擦を結びつけるところみ

がおこなわれた。Bryant⁹⁾等は、空气中、酸素中、水蒸気中及び超高真空中で黒鉛結晶の劈開を行なったところ超高真空中では劈開エネルギーは高かったが、空気、酸素、水蒸気等によって応力腐蝕がおり、これが劈開エネルギーをさげた。吸着蒸気による黒鉛の低摩擦挙動と劈開エネルギーの低下とが一致する事から、摩擦挙動が結晶層間の結合力にもとづいて説明出来るのとべている。

Flom⁹⁾等は、黒鉛の劈開中に生じるガスを分析し、主なガスはメタンであり、さらに劈開面の作成にともなって、CO と N₂ が選択的に劈開面に吸着する事を示している。さらに劈開面の光学顕微鏡写真から、大気中で劈開したものが真空中で劈開したものより表面が滑らかである事を示している。これらの結果は、大気中での低摩擦と良好な劈開性とが密接に関連している事を予想させた。その後、Savage¹⁰⁾ はレンズで黒鉛を摩擦し、摩擦によって結晶が単に基底面にそってすべるのではなく、かなり複雑な現象を含んでいる事を観察し、摩擦と劈開とが簡単に結びつかない事を示している。

このように、黒鉛においては蒸気の吸着が低摩擦、低劈開強さをもたらし、真空中で高温脱ガスした試料では高摩擦と大きい劈開強さをもたらした。黒鉛の結晶層間の強さは層内の強さよりも弱い、吸着蒸気がさらに層間の強さを弱めるように働く事は明らかであり、結晶の吸着物の影響によって著しく結合力が変化する物質である事がわかる。以上の結果から、真空中高温加熱を受ける条件で黒鉛を使用する場合、あまり低摩擦を期待出来ない事がわかる。

2.3 MoS₂ の摩擦

MoS₂は黒鉛とよく似た黒い物体であり、天然には大きな単結晶として産出するが、人造のものは一般に非常に小さな粉末として得られる。その結晶構造は、Dickinson と Pauling¹¹⁾により、図10に示すような構造である事が知られている。Mo とSは比較的接近しているが、S とSは比較的はなれている。そして、S-Mo-Sは強い共有結合からなっているが、S層間は弱い van der Waals 結合からなり、剪断がおこるのはこの弱い結合面であり、低摩擦をもたらすものと考えられる。

最初、MoS₂の潤滑能についても黒鉛と同様蒸気潤滑理論で説明しようという試みが行なわれたが、Savage¹²⁾が MoS₂の摩擦実験を真空中(5・10⁻⁵Torr)で行ない、摩擦挙動は吸着蒸気に依存しない事を報告している。その後 Johnson と Vaughn¹³⁾は真空中で摩擦実験を行ない、良くなじんだ面では、一定時間停止した後摩擦を再開すると、摩擦開始時に図11に示すような高摩擦を示し、摩擦とともに低摩擦にさがるきみょうな現象をみつけた。これを蒸気潤滑理論で説明しようと考

図10 MoS₂ の構造 (Dickinson and Pauling¹¹⁾)

図11 Stop time による摩擦係数の変化 (Johnson and Vaughn¹³⁾); 真空中

え、摩擦中 MoS₂の摩擦表面に無定形の硫黄層が作られ低摩擦を示し、そして、この層が停止中に蒸発するため摩擦再開時に高摩擦になると考えた。このように、はじめ黒鉛の蒸気潤滑理論に影響されていた。Haltner¹⁴⁾が十分にガス出しをした 10⁻⁸Torr の超高真空中で MoS₂の摩擦実験を行なったところ、数週間の停止後においてさえ、摩擦を再開する事によってすぐ摩擦が低くなる事を見出した。もし、Johnson¹³⁾等の説明のように、蒸気潤滑として働く無定形硫黄が摩擦中に作成されるならば

図12 脱ガスしない真空系における Stop time の効果 (Haltner¹⁴⁾)

○ : Stop time 96h, $2 \cdot 10^{-7}$ Torr,
 □ : Stop time 53h, $1.4 \cdot 10^{-7}$ Torr,

図13 摩擦速度による摩擦の変化(Haltner¹⁴⁾)

△ : 1気圧空気, ○ : $6 \cdot 10^{-6}$ torr, □ : $3 \cdot 10^{-7}$ torr, 破線は $2 \cdot 10^{-9}$ torr.

摩擦の遷移過程がみられてもよいのに、それがみられない事から、黒鉛と異なり MoS_2 の潤滑作用は MoS_2 自身の性質によるものであると結論した。そして、ガス出しが不十分な真空系においては、図12に示すような従来からみられる Stop time の効果がみられ、さらに種々の真空度において、図13にみられるような速度と摩擦係数の関係を得ている。停止時間による摩擦の上昇は、真空系の残留ガスの吸着により摩擦が上昇するものと考え、摩擦を再開すると摩擦加熱により吸着ガスの脱離がおり摩擦が低下していくため、摩擦の遷移過程がみられると

図14 MoS_2 と MoS_2 付着銅板との摩擦におよぼす水蒸気分圧の影響 (Haltner and Oliver¹⁷⁾)

説明している。

摩擦がガスの吸着脱離に影響されるとすれば、 MoS_2 の摩擦中にどのようなガスが放出されるかに興味もたれる。Flom¹⁵⁾等は超高真空中で MoS_2 の劈開実験を行ない、その時放出されたガスを質量分析器で調べたところ主な放出ガスはメタンであり、硫黄を含んだガスを検出する事が出来なかった。この事より Johnson¹³⁾ 等の考えるような無定形の硫黄による潤滑の可能性はないと考えられる。

水蒸気の吸着による摩擦の上昇について、Midgley¹⁶⁾ によって知られていたが、摩擦の上昇の理由を、Deacon⁶⁾等は MoS_2 結晶間で水が存在すると結晶間の水素結合を起させ、それで結晶間の凝着を増加させると考えている。さらに水蒸気の効果について、Haltner¹⁷⁾ 等はさらに詳細に調べ、図14のような結果を得ている。このように、 MoS_2 の摩擦において、真空中の摩擦より水蒸気を含んだ窒素中の摩擦係数が大きいのは水蒸気の影響であり、水蒸気が黒鉛と異なり MoS_2 の摩擦を上昇させるのがわかる。このように、ガスの吸着が MoS_2 の摩擦に著しい効果をおよぼすのは興味深い事である。

著者¹⁸⁾等が、さらに詳細に停止時間による摩擦と接触電気抵抗の変化 (Stop time の効果) を調べたところ、 $5 \cdot 10^{-9}$ Torr の真空中で、定常摩擦係数が比較的高い摩擦ははじめにおいて、図15に示すような Stop time の効果が観察された。摩擦停止中に摩擦は下がり、摩擦にともないもの高い定常摩擦係数に回復するのがみられた。定常摩擦係数は低く、 MoS_2 被膜の寿命に近い良くなじんだ面では、図16のような従来から観察されている Stop time の効果がみられ、停止中に摩擦は増加した。このように、摩擦開始後から被膜の寿命のくる直前まで

図15 Stop time と摩擦係数の関係： $5 \cdot 10^{-9}$ torr (松永，星本，内山¹⁸⁾)

図16 Stop time と摩擦係数の関係： $5 \cdot 10^{-9}$ torr (松永，星本，内山¹⁸⁾)

の間に、 MoS_2 被膜の厚みは次第に薄くなり、同時に MoS_2 の吸着分子数も少なくなる事が考えられ、Stop time によって、摩擦の上昇のみならず、低下するのが観察された事は非常に興味深い事である。この実験において、真空系の脱ガスはせいぜい 150°C で行なったものであり、試料の脱ガスは十分とはいえない。摩擦開始時の定常摩擦係数は比較的高く、停止中に MoS_2 被膜表面から吸着物の脱離がおり低摩擦を示すが、摩擦とともに表面層の摩耗をともしない、下から汚れた面が露出し高摩擦を示したのと考えて良い。被膜寿命に近くなると、 MoS_2 被膜の吸着物は少なく、定常摩擦係数は低い

と考えられ、その時には停止中に MoS_2 被膜へガスの吸着がおり、高摩擦を示し、摩擦加熱によって低い定常摩擦係数になるものと考えられる。また、これらの Stop time の効果は、真空系の残留ガスによって著しく影響を受ける事は明らかである。雰囲気の効果調べるため、真空系に乾燥空気および室内空気を導入し、摩擦係数と接触電気抵抗の変化を調べてみると、図17のようになった。乾燥空気は、それ程著しい摩擦係数の上昇をもたらさなかったが、接触電気抵抗 R は著しく変化し、吸着空気分子が接触電気抵抗を高めた。さらに室内空気を入れると摩擦係数は高くなり、水蒸気が著しく摩擦を高め

図17 雰囲気による摩擦の変化 (松永, 星本, 内山¹⁸⁾)

図18 室内空気圧力と μ_k の関係: 20.5°C, RH 48%
▲..... $2.1 \cdot 10^{-6}$ torr
(松永, 田中, 星本, 内山¹⁹⁾)

る事がわかる。一旦真空中に排気後、室内空気を導入し、室内空気圧力と摩擦係数との関係を調べたところ、図18のような結果が得られ、室内空気は MoS_2 の摩擦を高めることがわかる¹⁹⁾。さらに、各圧力において、10分間停止した時のStop timeによる摩擦の変化を調べると、図19のような結果が得られた。この結果から、Stop timeの効果は吸着ガス分圧によって著しく影響される事がわかる。

以上の結果より、 MoS_2 の摩擦係数は室内空気中において高く、真空中では低い。このため、 MoS_2 は真空中

で使用する潤滑剤として有望である。

2.4 四フッ化エチレン樹脂の摩擦摩耗

ポリエチレン、アクリル、三フッ化エチレン樹脂等は真空中で清浄にした後摩擦すると、空气中より高摩擦を示すが、四フッ化エチレン樹脂 (PTFE) は、真空中においても低摩擦である事が知られている²⁰⁾。分子構造はポリエチレンの水素原子をフッ素原子で置換したもので $[-\text{CF}_2-\text{CF}_2-]_n$ で示される。PTFE は液体に対し濡れ難く、化学的に不活性である。PTFE の低摩擦について、Makinson²¹⁾ 等は 図20 に示すような PTFE の結晶構造と関連づけている。1 個の単位は 図20 (a) に示すような block や band (長さ $10 \sim 100 \mu$, 巾 $0.2 \sim 1 \mu$) とよばれる構造からなり、これらの単位は $200 \text{\AA}$ の厚みをもつ slice から出来ている。それらの slice は弱い結晶か非晶質部分により分離されていて、個々の slice は高度に配列した分子の sheet からなっている (図20.b)(c)。PTFE が清浄な面をすべる時、摩擦表面間に凝着がおきると考えられ、もし結晶の剪断速度が十分小さい時には、すべりが分子の sheet 内でもおきるだろう。主な過程としては slice 自身のすべりが生じるだろう。このように、PTFE の低摩擦は摩擦表面間の凝着が弱いのではなく、PTFE の構造によるものと説明されている。たしかに、著者²²⁾ 等が行なった PTFE とガラス板との摩擦において、ガラスに強く付着した PTFE フィルム

図19 Stop time 10分による μ_k の変化：室内空气中20.5C°, RH 48% (松永, 田中, 星本, 内山¹⁹⁾)

図20 PTFE の構造 (Makinson and Tabor¹¹⁾)

図21 磨耗量および摩擦係数と摩擦距離との関係
(田中, 内山, 豊岡)
(真空中) 平板: 工具鋼, 荷重: 1,000g

はすべり方向に配向し、付着厚みもほぼ slice の厚み程度である事からも、PTFE の結晶構造と低摩擦とは重要な関連がある事がわかる。直径 3mm の PTFE pin を荷重 1000g で真空中において工具鋼板に摩擦した結果を図21に示す。磨耗量 $h(\mu)$ と摩擦距離 $L(m)$ との関係は、 L の広い範囲で直線的である。 $\Delta h / \Delta L$ を磨耗率 α と定義し、 α の単位に μ/m を採用する。図21において、摩擦係数 μ_k もまた広い範囲で一定である。摩擦係数

図22 磨耗量および摩擦係数と摩擦距離との関係 (田中, 内山, 豊岡²²⁾)
(真空中) 平板: 工具鋼, 荷重: 2,000g

図23 磨耗量におよぼす荷重の影響 (真空中)²²⁾
平板: 工具鋼

および磨耗率が一定である過程を、定常摩擦過程および定常磨耗過程と呼ぶことにする。荷重 2000g では図22の磨耗曲線において、摩擦距離が 600m までの領域と、1200m 以上の領域と 2 つの定常磨耗過程がある。このよ

図24 摩耗量におよぼす荷重の影響（真空中）²²⁾
平板：工具鋼

図25 工具鋼に対する摩耗率と接触圧力との関係²²⁾

図26 摩耗量におよぼす荷重の影響（真空中）²²⁾
平板：ガラス

うな定常過程が1つでないときは、摩擦距離の小さい側から順に、第1期、第2期と番号をつけ、それぞれの摩耗率を、 α_1, α_2 、摩擦係数を μ_{k1}, μ_{k2} とする。図22より第1期定常過程にくらべ、第2期定常過程における摩耗率と摩擦係数は大きい。PTFEを工具鋼板に、真空中および空气中で摩擦したときの摩耗曲線を、図23、図24に

図27 摩耗量におよぼす荷重の影響（空气中）²²⁾
平板：ガラス

図28 ガラスに対する摩耗率と接触圧力との関係²²⁾

表1 k および n の値²²⁾

但し $\alpha = k p^n$

α : 定常摩耗率 (μ/m), p : 接触圧力 (kg/cm^2)
(添字 1, 2 は第1期および第2期を示す)

	工 具 鋼				ガ ラ ス	
	k_1	k_2	n_1	n_2	k	n
空气中	—	3.8×10^{-2}	—	1.2	1.7×10^{-2}	1.3
真空中	1.4×10^{-5}	2.7×10^{-2}	2.5	1.3	6.9×10^{-3}	1.7

表2 定常過程における摩擦係数²²⁾

(添字 1, 2 は第1期および第2期を示す)

	工 具 鋼		ガ ラ ス
	μ_{k1}	μ_{k2}	μ_k
空 気 中	0.20	0.27	0.29
真 空 中	0.20	0.24	—

示す。これより、空気中では真空中より第1期定常過程が短い事がわかる。摩擦面の表面観察から、空気中の摩擦の方が工具鋼板へのPTFEの付着が著しく、付着したPTFE粉がPTFE pinをけずり高摩擦率の第2期定常過程に入るものと思われる。工具鋼板にPTFE pinを摩擦したときの摩擦率と接触圧力との関係を、図25に示す。第2期定常摩擦率は、真空中と空気中ではあまり変わらなかった。PTFE pinとガラス平板との摩擦は、1つの定常過程とみなすことが出来、真空中および空気中の摩擦曲線をそれぞれ、図26、図27に示す。これより、摩擦率と接触圧力との関係は図28のようになり、真空中の方が高摩擦率を示した。一般に、摩擦率 α (μ/m) と接触圧力 p (kg/cm^2) との関係は、 $\alpha = kp^n$ で表わされ、表1に k, n の値をまとめて掲げた。また、その時の摩擦係数を表2に示してある。摩擦率 α が接触圧力 p に依存する事についても、さらに詳細に検討を行なった²⁸⁾。

PTFEが真空中で温度変化した時の摩擦について、Craig²⁴⁾は約10psiの圧力において静摩擦係数を求め、図29の結果を得ている。これより、かなり広い温度範囲においても低摩擦を維持している事がわかる、さらに長期間真空中にさらしても、放出されるのは水蒸気で、PTFEの化学的分解がおこらなかった事から、熱的にかなり安定であり、真空中の軸受として有用であるう。

3. 真空中における潤滑

空気中の潤滑剤としては、一般に油、グリース、固体潤滑剤が使用されているが、真空中の潤滑剤は、低圧力において蒸発がおきず、また、高真空を得るため脱ガスするときの高温に耐えねばならず、油、グリース等は普通使用出来ない。

そこで真空中で使用される潤滑剤として具備すべき条件を次のように要約してみた。

1. 真空中において、蒸発および化学分解による質量損失をおこさないこと。
2. 真空中において、低摩擦を示すこと。
3. 真空中、高温加熱が可能なこと。
4. 真空中、摩擦部へ連続供給が可能なこと。

このような条件を満たすものとして、 MoS_2 、PTFEがあげられる。これらの MoS_2 、PTFE、の実際上の使用方法として図30のように、 MoS_2 をブラシのように用いる方法、図31のように MoS_2 圧縮体、PTFEで軸受を作る方法等が考えられる。一定の寿命範囲で使用する場合には、 MoS_2 粉末をこすりつけ、被膜を摩擦部に作成する

図29 軸受表面に溶融付着させたPTFEの静摩擦 (Craig²⁴⁾) ($10^{-7} \sim 10^{-8}$ torr)

図30 ブラシ式潤滑剤供給方式

図31 潤滑剤を用いた軸受

方法、または、摩擦面にモリブデンをメッキし、 H_2S ガスと反応させ、 MoS_2 を表面に作成する方法がとられる。しかし、一旦 MoS_2 被膜が破れると周囲から MoS_2 を補充する事が困難なので、ブラシ式のように連続供給する事によって、永久潤滑が可能である。すでに空気中においてブラシ式供給法によって良好な結果が得られている。²⁵⁾

4. 結言

空気中で摩擦するとき、いかに試料を清浄にしても吸着気体によって表面はおおわれている。そのため、空気中で低摩擦を示したからといって、真空中で低摩擦を示すとは限らない。真空中では、金属同士の摩擦は一般に高く、これらの潤滑には、 MoS_2 、PTFEの使用が有望である。ここでは、真空中における摩擦摩擦の一部について説明したが、いろいろ不明な点が多い。真空中での摩

擦摩耗は、実用上および摩擦機構を明らかにする上で重要であり、一層の研究が望まれる。

〔文 献〕

- (1) R. Wilson : Proc. Roy. Soc. A 212 (1952) 450.
- (2) F. P. Bowden and G. W. Rowe : Proc. Roy. Soc. A 233 (1956) 429.
- (3) W. Bragg : Nature. 115 (1925) 266.
- (4) R. H. Savage : J. Appl. Phys. 19(1948) 1.
- (5) R. H. Savage and D. F. Schaefer : ibid. 27(1956) 136.
- (6) R. F. Deacon and J. F. Goodman : Proc. Roy. Soc. A 243 (1958) 464.
- (7) G. W. Rowe : Wear. 3(1960) 274.
- (8) P. J. Bryant, P. L. Gutshall and L. H. Taylor : Wear. 7 (1964) 118.
- (9) D. G. Flom, A. J. Haltner and C. A. Gaulin : ASLE Trans. 8(1965) 133.
- (10) R. H. Savage : Wear, 10(1967) 397.
- (11) R. G. Dickinson and L. Pauling : J. Am. Chem. Soc. 45 (1923) 1466.
- (12) R. H. Savage : Fundamentals of Friction and Lubrication in Engineering. ASLE. Chicago (1954) p 161.
- (13) V. R. Johnson and G. W. Vaughn : J. Appl. Phys. 27(1956) 1173.
- (14) A. J. Haltner : Wear. 7(1964) 102.
- (15) D. G. Flom, A. J. Haltner and C. A. Gaulin : ASLE Trans. 8(1965) 133.
- (16) J. W. Midgley : J. Inst. Petrol. 42 (1956) 316.
- (17) A. J. Haltner and C. S. Oliver : J. Chem. Eng. Data. 6 (1961) 128.
- (18) 松永, 星本, 内山 : 昭和44年度精機学会春季大会学術講演会前刷, p. 77.
- (19) 松永, 田中, 星本, 内山 : 昭和44年度精機学会秋季大会学術講演会前刷, p. 159.
- (20) R. F. King and D. Tabor : Proc. Phys. Soc. B 66 (1953) 728.
- (21) K. R. Makinson and D. Tabor : Proc. Roy. Soc. A 281 (1964) 49.
- (22) 田中, 内山, 豊岡 : 潤滑 12, (1967) 31.
- (23) 田中, 内山 : 潤滑 14(1969) 33.
- (24) W. D. Craig : Lubrication Engineering. 20 (1964) 273.
- (25) 田中, 内山, 豊岡 : 昭和44年度精機学会秋季大会学術講演会前刷, p. 155.