

# 真空中における Ni, Cu, Au の摩擦と摩耗の一実験

曾田 範宗・木村 好次・田中 章浩

## Experiments on Friction and Wear of Ni, Cu and Au in Vacuum

By

Norimune SODA, Yoshitsugu KIMURA and Akihiro TANAKA

**Abstract:** Experiments have been carried out on friction and wear characteristics of Ni/Ni (Ni sliding on Ni), Cu/Cu and Au/Au in vacuum of  $10^{-6}$  Torr. A pin-and-disk machine has been used and tests have been conducted at room temperature, with the constant load of 262 grams and sliding velocities varied from 21 to 335 millimeter per second. The results obtained are as follows.

(1) In the cases of Ni/Ni and Cu/Cu, coefficient of friction,  $\mu$ , is low during the first several meters of sliding, which is followed by an abrupt rise in  $\mu$ ; after that the value of  $\mu$  decreases very slowly, still maintaining high value. In the case of Au/Au, high value of  $\mu$  is obtained from the outset of sliding, but the gradual decrease is observed also in the same way as the above cases.

(2) The average value of  $\mu$  for Cu/Cu and Au/Au is constant irrespective of the sliding velocity; that for Ni/Ni, however, seems to be higher in the high velocity range.

(3) Wear rate first decreases as the sliding velocity increases. After arriving at some minimum value at a certain velocity, which varies with metal combinations, it increases with the increase of the sliding velocity. Since similar characteristics are observed also in the case of Au/Au, they may not always be accounted for by the lubricating effect of adsorbed oxygen layer.

(4) With the increase in the sliding velocity, the wear scar is progressively roughened, and the wear debris increases in size. On the other hand, no change is observed in the hardness of wear scar with the change in sliding velocity.

### 概 要

$10^{-6}$  mmHg 程度の真空中において、Ni, Cu, Au の3種類の純金属により、同種金属同士の摩擦、摩耗の実験を行なった。実験はピン／円板型の試験機を用い、室温、一定荷重のもとで何段階かのすべり速度について行ない、速度特性に重点をおいた。

ここで得られたおもな結果は以下のとおりである。

(1) Ni, Cu の場合には、摩擦を開始してから数 m のあいだ、摩擦係数  $\mu$  は低い値を示しているが、その後急に上昇し、以後すべり距離が増すに伴ってやや減少する傾向を示す。一方、

Au の場合には、摩擦開始直後から  $\mu$  は高い値を示し、その後は摩擦が進むにつれて Ni, Cu と同様の減少を示した。

(2) Cu と Au の場合には、摩擦係数は、すべり速度に関係なくほぼ一定であるが、Ni についてはすべり速度の大きい領域で摩擦係数は高くなっている。

(3) Ni, Cu, Au のいずれにおいても、あるすべり速度まではすべり速度が増すにつれて摩耗量は減少し、その後すべり速度の増加に伴い摩耗量は増大する。この境界となる速度は金属により異なる。この特性は Au についても顕著に見られるので、酸素の化学吸着による潤滑効果では説明できないようである。

(4) すべり速度が増すにつれて摩擦面の荒れははげしくなり、発生する摩耗粉の粒子は大粒となってくるが、摩擦面のかたさはすべり速度には無関係である。

## 1. ま え が き

真空中における金属の凝着摩耗について、著者の一人と笹田はすでに本集報に報告している [1]。以下それを前報と呼ぶ。

この問題は、いわゆる乾燥摩擦に属するものであるが、実は気体の境界潤滑剤としての作用がはなはだ大きな影響をおよぼしているのであって、境界摩擦の一つの基礎研究と考えるべきものであり、前報においてもこのような立場から考察を加えた。またこの問題は、一面において近年著しい発達を見た宇宙工学の分野における潤滑問題への手がかりを得るために、実用面からもその解決をせまられているものである。

このような観点から、摩擦速度、荷重など前報の実験範囲をひろげると共に、上に述べた基礎・応用の両面から興味のある問題として、液体窒素程度の低温における摩擦、摩耗をしらべるとも考慮して新たに研究のプロジェクトをたてた。本稿ではその第一報として、本実験の装置と手法についてやや詳しく述べ、室温、真空中 ( $10^{-6}$  mmHg 程度) で得た若干のデータについて論ずる。

## 2. 実 験

### 2.1 実 験 装 置

図 1 に実験装置の概略を示す。摩擦部分はステンレス鋼製の真空容器 I のなかに収められており、任意のふん囲気中、低温～室温における摩擦が行なえるようになっている。以下、実験装置の主要部分の詳細を個々について述べる。

#### 2.1.1 摩 擦 系

摩擦部分の概要を図 2 に示す。回転する円板状試験片 B に下方より棒状試験片 A の一端を押しつけ、一周 50 mm の摩擦軌道をくり返し摩擦させるものである。

(a) 棒状試験片の支持、ならびに負荷法について

棒状試験片は図 1, 2 に示すようにステンレス製の腕 C に固定される。C は 2 個の玉軸受を用いて容器 I の内壁に取り付けられており、鉛直面内では軸受のまわりに自由に回転できるようにになっている。一方水平面内では途中に抵抗線ひずみ計 E をはり付けた板ばね D により若干の弾性変位が許されている。なおこの腕の水平面内における固有振動数は 33 c/s であ

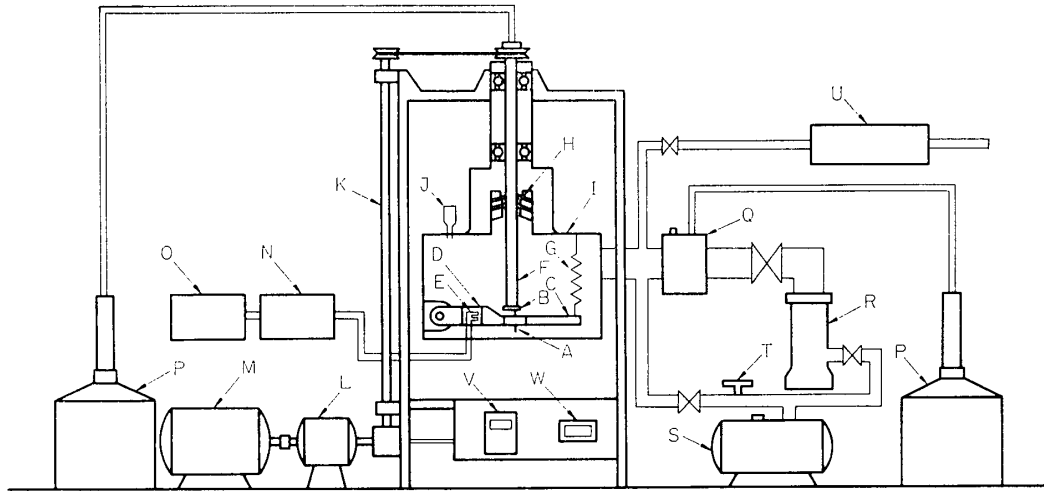


図 1 実験装置概略図

- |             |               |           |
|-------------|---------------|-----------|
| A: 棒状試験片    | I: 真空容器       | Q: トラップ   |
| B: 円板状試験片   | J: 電離真空計      | R: 油拡散ポンプ |
| C: 腕        | K: 駆動軸        | S: 油回転ポンプ |
| D: 板ばね      | L: 変速機        | T: ガイスラー管 |
| E: 抵抗線ひずみ計  | M: 電動機        | U: 空気ろ過装置 |
| F: 回転軸      | N: 動ひずみ計      | V: 回転計    |
| G: コイルばね    | O: ペン書きオシログラフ | W: 積算回転計  |
| H: ウイルソンシール | P: 魔法びん       |           |

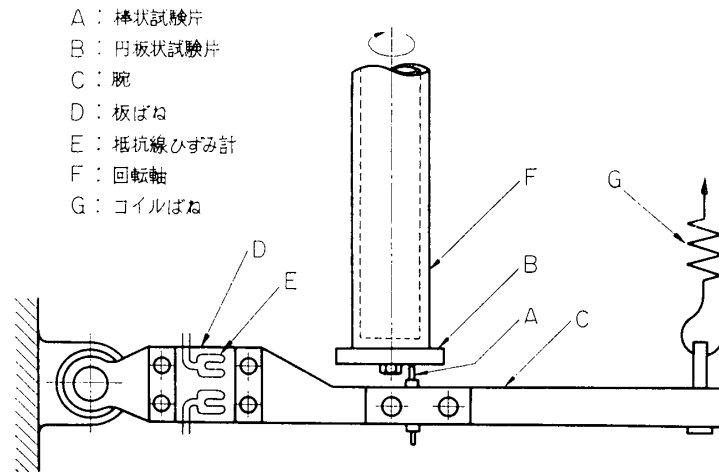


図 2 摩擦部分詳細図

る。

つぎに負荷法について述べると、本実験では 1 種類のコイルばね G を用いており、腕 C に取付けるフックを交換することにより、ばねの伸びを変えて 6 種類の負荷荷重を得ることができる。

(b) 円板状試験片の支持と駆動について

円板状試験片は中空の垂直回転軸 F の下端に固定される。回転軸は上方で真空容器外の二つの玉軸受により支持されていて、可変速交流電動機により無段変速機を介して駆動される。

### 2.1.2 真空装置

本実験で用いた排気装置は、真空容器 I に油拡散ポンプ R と油回転ポンプ S を直列につないだものであって、この装置による最高真空到達度はおよそ  $10^{-6}$  mmHg である。真空容器 I 内の圧力を知るためには、 $10^{-2}$  mmHg 台まではガイスラー管を、それ以上は電離真空計を使用している。また、回転軸 F のまわりの密封には図 1 に示すようにウイルソン・シール H を使用している。このシールにはニトリルゴム、シリコンゴム、シリコンゴムにテフロンを被覆したものの 3 種を用い、そのしめしろをいろいろに変えて予備実験を行なった。その結果、この中ではシリコンゴムにテフロンを被覆したものが最ももれが少なく、高速回転の場合でも真空度の低下は  $8\sim 9 \times 10^{-6}$  mmHg 程度までであったので、本実験ではこれを用いている。

### 2.1.3 低温装置

本稿では常温での実験について報告するが、まえがきで述べたようにさらに低温での実験をも予定しているので、低温装置についてもここでふれておく。本装置においては、中空回転軸 F 内に液体窒素を自動補給し、その液体窒素により回転軸 F の先端に取付けた円板状試験片 B を冷却するようになっている。

### 2.1.4 空気ろ過装置

いわゆる大気中での実験を行なう場合には、一度容器 I の内部を  $10^{-2}$  mmHg 程度まで排気し、その後ろ過した空気を大気圧まで導入する。このろ過装置は脱脂綿、濃硫酸、活性炭、塩化カルシウム、シリカゲルのおのおのを封入した容器を順に直列につないだもので、大気中のごみや水分を除外することを目的としたものである。

### 2.1.5 摩擦力の測定について

棒状試験片 A と円板状試験片 B との間の摩擦力により腕 C が変位するが、その変位量を板ばね D の上に貼付した抵抗線ひずみ計 E を使って動ひずみ計で測定し、摩擦力に換算する。

### 2.1.6 摩耗量の測定について

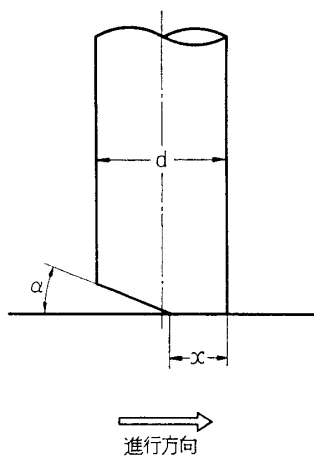


図 3 棒状試験片の形状

本実験に用いた棒状試験片の先端は図 3 に示すようなもので、水平面に対し  $\alpha=20^\circ$  の傾きをもった面に仕上げられている。ここではもっぱら、棒状試験片の摩耗量にのみ着目した。その摩耗体積  $W$  は次式で与えられる。

$$W = \frac{d^2}{8} \tan \alpha \cdot \left( \sin \theta - \frac{1}{3} \sin^3 \theta - \theta \cos \theta \right)$$

$$\text{ただし } \theta = \cos^{-1}(1 - 2x/d)$$

ここで  $d$ ,  $\alpha$ ,  $x$  は図 3 に示すとおりである。

## 2.2 試験片

本稿では表 1 に示した 3 種類の純金属 Ni, Cu, Au の同種純金属同士の摩擦・摩耗について報告するが、これらは同一の結晶系 (fcc) に属し、酸素の化学吸着熱の異なるものとして選

表 1

金 属	純 度 (%)	かたさ, $H_V(0.05)$	酸素吸着熱 (kcal/mol)
Ni	99.6	210	110
Cu	99.99	137	70
Au	99.99	162	0

表 2

電解脱脂液		金 属	Ni	Cu, Au
成分 (g/l)	{	Na <sub>2</sub> OH	70	5
		NaPO <sub>3</sub>	10	12
		Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	15	11
電 圧			6V	6V
極 性			陽極	陰極
温 度			室温	室温

扱ったものである。この3種の純金属の中では Ni への吸着熱が最も大きく、また Au への吸着熱のみ負である。なお Ni を除き、あらかじめ十分に冷間加工を行なって加工硬化させた状態のものを用いた。

円板状試験片の外径は Ni のみ 40 mm, Cu, Au は 20 mm であり、三者共にその中心部に回転軸への取付けのための 5 mm の穴を設けてある。棒状試験片としてはすべて外径 2 mm のものを使用し、その先端は前述のように加工してある。

### 2.3 実験手順および条件

実験を行なうについて、まず円板状試験片はその摩擦を行なう面をエメリペーパーにより、1 M, 1 F, 0/2, 0/4, 0/9 の順に非潤滑状態で研磨し、その後石油ベンジンとトリクロルエチレンを用いて洗浄して、さらに蒸留水で洗った。棒状試験片もやはりエメリペーパーで前述のような形状に仕上げたのち、同様の洗浄を行なった。(両試験片とも、上の操作を繰り返して何回も使用した。) つぎにこの研磨と洗浄の済んだ試験片を表 2 に示す液を用いて約 2 分間電解脱脂し、蒸留水で十分水洗いを行なった。この段階で、もし試験片表面が蒸留水により均一にぬれないときには、電解脱脂をくり返し行なった。以上の操作で、蒸留水により表面が一様にぬれるようになった試験片を前述の所定の位置に取付け、治具を用いて一定の荷重が加わるようにした。この際、試験片を取付ける腕と回転軸の下部はトリクロルエチレンをひたした脱脂綿で良くぬぐい、取付けに用いる工具や治具はそのつど電解脱脂を行なった。試験片の取付けが終り、所定の荷重を加えてから、真空容器を密閉して真空ポンプにて排気を行なった。本稿ではもっぱら  $(3 \pm 2) \times 10^{-6}$  mm Hg の真空状態で実験を行なったが、この状態に到達するまでにはほぼ二時間を要し、実験中もポンプは作動を続けたままにした。表 3 に実験条件をまとめて示す。

表 3

荷 重 (g)	262
総すべり距離 (m)	50
真 空 度 (mmHg)	$(3 \pm 2) \times 10^{-6}$
温 度	室 温
すべり速度 (mm/s)	21.0, 42.0, 83.8, 125.6, 167.5, 209.4, 251.3, 293.0, 335.0

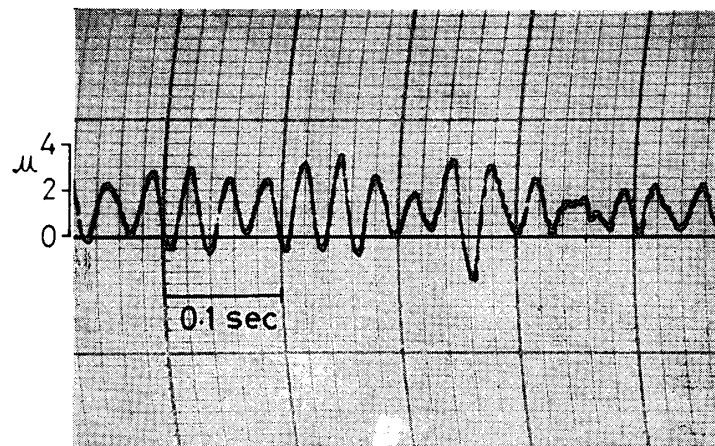


図 4 Cu/Cu の摩擦係数のペン書きレコーダによる記録例

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 摩擦係数について

##### 3.1.1 摩擦係数の記録について

図 4 に、抵抗線ひずみ計 E で検出した動ひずみの、ペン書きレコーダによる記録例を示す。図から明らかなように前述した腕 C の固有振動が強く現われているが、腕の固有振動数が 33 c/s であるのに対し、レコーダの動特性は 70 c/s であるから、その 1 次の振動には十分追従し、この記録は棒状試験片の変位を忠実に表わしていると考えられる。

ところで図 4 に見られるように棒状試験片は激しい振動をしているので、まずこの振動による摩擦速度の変動をチェックしておく。図のひずみ波形は近似的にランダムに振幅の変化する正弦波とみられるから、数種類のすべり速度での実験の記録について平均(片)振幅  $A_0$  を求めた。その結果は図 5 に示すとおりであって、ここでは Cu の実験についてのみ系統的に求めたが、他の場合もあまり差は見られなかった。いま棒状試験片の変位を振幅  $A_0$  なる正弦波とすれば、円板状試験片の軌道上の速度を  $v$  として、摩擦速度は  $v - A_0\omega \sim v + A_0\omega$  の範囲で変動していることになる。ここに  $\omega$  は腕 C の固有振動の角振動数で  $33 \times 2\pi \text{ s}^{-1}$  である。摩擦速度の変動比  $A_0\omega/v$  を図 5 にあわせ示す。以下の議論においては平均摩擦速度のみを考慮したが、100 mm/s 以下のすべり速度においては問題の生ずる可能性がある。

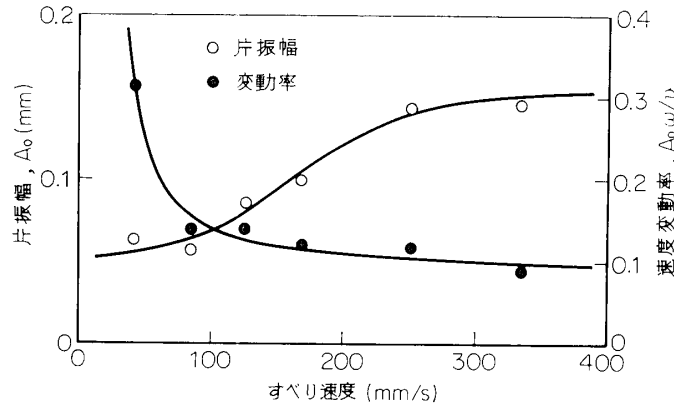


図 5 Cu/Cu の平均振幅, 速度変動率とすべり速度との関係

図 4 の記録そのものは, 上述したようにランダムに変化する入力すなわち摩擦力を受けたばね系の変位であり, この波形自体われわれが興味を持っている摩擦力の変動ではないが, 本稿では波形の解析には立入らず, 摩擦力の平均値のみを取上げる. ばね系が線形の特性をもてば変位の平均値は摩擦力の平均値に対応するから, ここではこの仮定のもとで, 適当な幅で移動平均をとって摩擦係数に換算することとした.

このような平均値のみを対象にするには, 上に掲げたペン書きレコーダの記録ではゲインが大きくとれず, 誤差が大きい. そこで故意に動特性の低いサーボ・レコーダを用いて記録した. その例を図 6 に示す.

### 3.1.2 摩擦係数とすべり距離の関係について

摩擦係数とすべり距離との関係を図 7, 8, 9 に示す. いずれについても, 前項で述べたような特徴は共通している. 図中折線はグラフを見やすくする目的でつないだものである.

さて, Ni と Cu ではともに摩擦を開始してからしばらくは摩擦係数が低く, 両者ともに 0.2 前後の値を示しているが, その後突然摩擦係数は急激に増大する. この急増は摩擦を開始する前に存在したかなり厚い酸化膜の破壊と対応するもので, 円板状試験片面の摩擦痕も

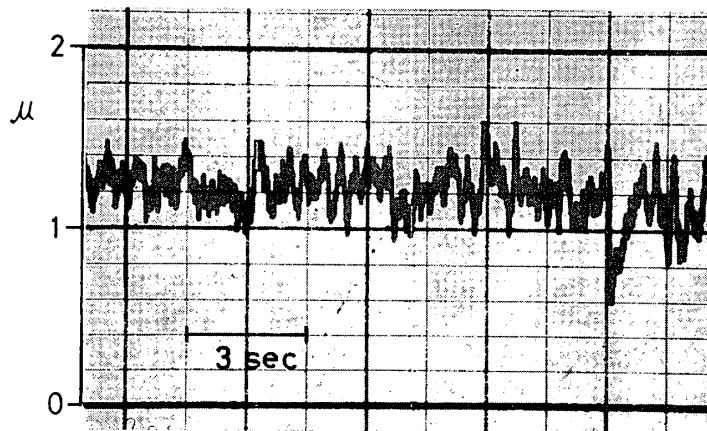


図 6 Cu/Cu の摩擦係数のサーボ・レコーダによる記録例

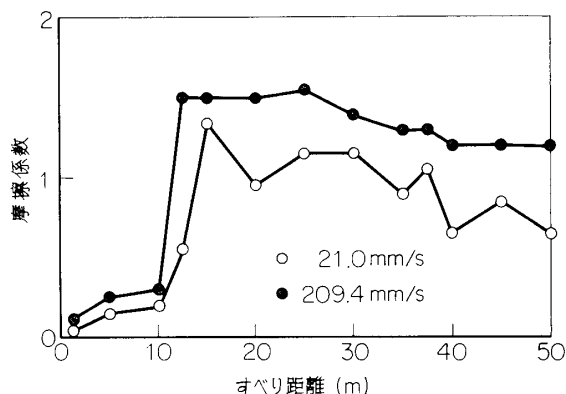


図 7 Ni/Ni, 摩擦係数とすべり距離との関係  
(ただし実験はすべて  $(3 \pm 2) \times 10^{-6} \text{mmHg}$   
中のもの)

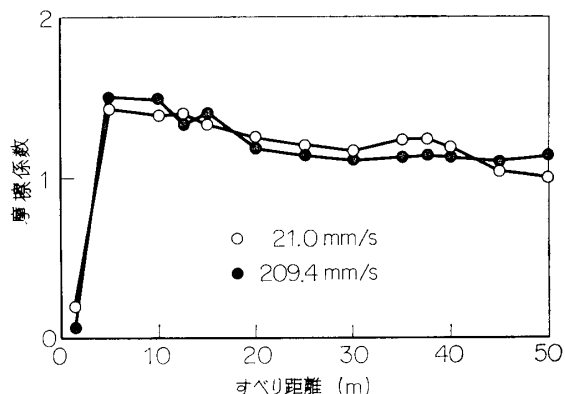


図 8 Cu/Cu, 摩擦係数とすべり距離との関係  
(ただし実験はすべて  $(3 \pm 2) \times 10^{-6} \text{mmHg}$   
中のもの)

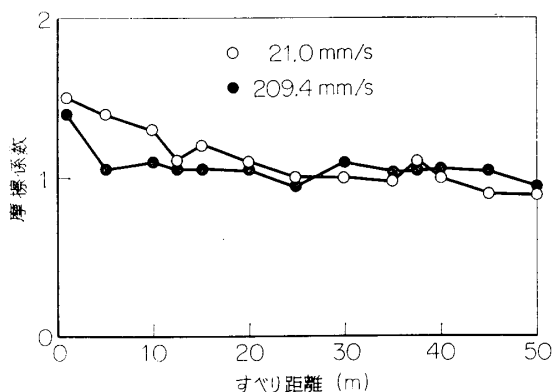


図 9 Au/Au, 摩擦係数とすべり距離との関係  
(ただし実験はすべて  $(3 \pm 2) \times 10^{-6} \text{mmHg}$   
中のもの)

それ以前は同心円状のごく軽微なものであったのが、急増後は **3.2.3** 項に述べるようにはげしい荒れをみせ、また急増以前にはほとんど摩耗粉が生じない。この摩擦係数が急増するまでの回転数はかなりばらついているが、Ni では約 250 回転、Cu では約 100 回転までで生じている。大気中でつくられた金属の新生面には瞬時にして酸化膜が生じ、Tingle [2] や Rabinowicz [3] も数十秒で金属保護作用の強い酸化膜の形成されることを認

めている。本実験の場合には摩擦面を研磨してから少なくとも 10 分程度は大気中におかれており、またベーキング等により強制的に酸化膜の除去を行っていないので、摩擦開始時には摩擦面が酸化膜で十分におおわれているものと思われる。ただし前述のように摩擦係数はあるところで急激に上昇し、以後の面の状態は装置内のふん囲気と一種の平衡状態になるものと思われるので、摩擦力の急増以後に着目すればこのような初期の酸化膜の影響は無視できる。

一方 Au の場合は Ni, Cu とは全く異なっており、前述したような摩擦係数の低い時期が存在しない。これは Au においては上に述べたような酸化膜が生じないためと考えられる。

図 7, 8, 9 に見られるように、一たん急増したのちの摩擦係数は、三者ともすべり距離の増加につれてだいに減少してゆく傾向を示している。この傾向は、ここでは図示していない他のすべり速度においても同様にみられている。このような傾向は Antler [4] や里吉・葉山 [5], [6] も同様に認めているが、この問題に関する議論は大気中における実験をも



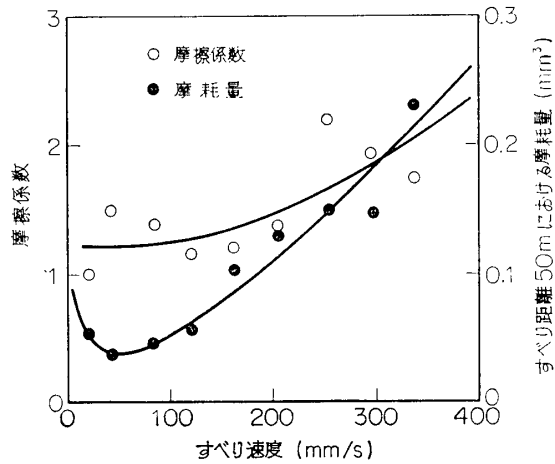


図 10 Ni/Ni, 摩擦係数, 摩耗量とすべり速度との関係 (ただし実験はすべて  $(3 \pm 2) \times 10^{-6}$  mm Hg 中のもの)

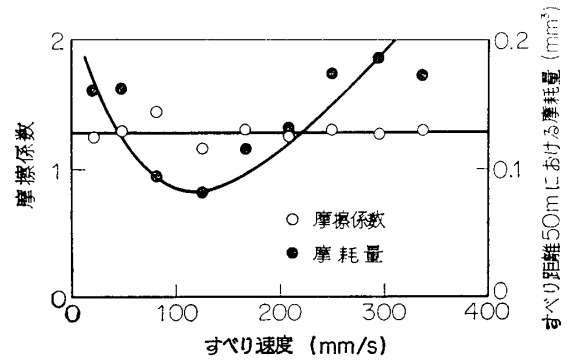


図 11 Cu/Cu, 摩擦係数, 摩耗量とすべり速度との関係 (ただし実験はすべて  $(3 \pm 2) \times 10^{-6}$  mm Hg 中のもの)

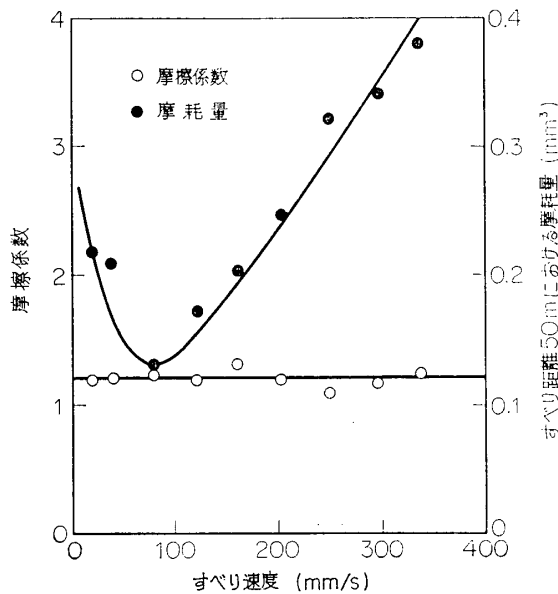


図 12 Au/Au, 摩擦係数, 摩耗量とすべり速度との関係 (ただし実験はすべて  $(3 \pm 2) \times 10^{-6}$  mm Hg 中のもの)

含めて続報にゆずることとする。

### 3.1.3 摩擦係数とすべり速度の関係について

摩擦係数とすべり速度との関係について、図 10, 11, 12 にその結果を示す。ここで摩擦係数の値としては、前述した急増後すべり距離 50 m までの平均値をとった。またこの図には摩耗量もあわせ示したが、その値はすべり距離 50 m に対するもので 3.2.2 項において論ずることとする。

まず Ni については、図 10 に見るとおり、得られた摩擦係数の値はばらつきは大きいがほぼ 1.0 から 2.0 の間に位置しており、すべり速度の増加に対してやや上昇する傾向が見られる。このような傾向は、1.0~2.0 という値そのものと共に、前報

[1] の結果とほぼ等しい。つぎにこの値を他の研究者の得た結果と比較すると、まず Bowden ら [7] は  $10^{-6}$  mm Hg 以下の圧力で 4.6 という値を得ており、また Buckley ら [8] は  $10^{-9}$  mm Hg 程度の真空中で 2.4 を得ている。両者ともに本実験の結果よりはかなり高い。

Cu については、図 11 からわかるように、すべり速度が変化しても摩擦係数はほとんど変化せず、およそ 1.3 の値を示している。この傾向は前報と同様であるが、値そのものは前報の 1.8 とかなり異なっている。Cu についての実験は他にも数多いが、Liu [9] は大気中ではあるが本実験と同様の速度範囲で実験を行ない、速度の増加に伴い摩擦係数がわずかに高

くなる結果を得ている。かれの得た摩擦係数の最も高い値が本実験の値と同程度である。上に引用した Bowden ら [7] の Cu についての実験値は 4.8 を示している。もっと真空度の高い実験では, Moeller ら [10] は  $10^{-9}$  mm Hg 程度で 3.8, Brown ら [11] は  $10^{-10}$  mm Hg で 3 前後の値を得ている。

Au については, 図 12 に示すように Cu と同様すべり速度の影響はほとんど認められず, 摩擦係数は約 1.2 の一定値である。この値は前述のように Antler の結果 [4] とほぼ同程度であるが, Bowden ら [7] の実験値はここでも高く 4.5 となっている。

境界摩擦における摩擦係数の値を面の汚れと関連させて論じたものに Tabor の論文 [12] があり, かれは表面被膜のせん断強さと材料自体のそれとの比  $k$  をパラメータとしたとき, 塑性変形による真実接触面積の成長が十分おこなわれる場合には,  $k \rightarrow 1$  に伴い摩擦係数が  $\infty$  に近づくことを示している。真実接触面積の成長がおこりうるといなどは実験方法や試験片形状によるところが大きく, 上に述べた諸実験値中 Bowden らの値がひとり大きい値を示しているのはそれらの条件によるものと思われるが, 他の実験値と本実験結果との関係は真空度のちがいにもとづく, いわゆるふん囲気の潤滑効果として定性的には理解されるものである。この問題に関する立入った議論は続報にゆずりたい。

### 3.2 摩耗量について

#### 3.2.1 摩耗量とすべり距離との関係について

各金属ごとに, 42.0 mm/s および 251.3 mm/s の 2 段階のすべり速度について, 摩耗量とすべり距離との関係を求めた。このさい問題になるのは 3.1.2 項に述べた Ni おとび Cu における初期の摩擦係数が低い部分の取扱いであるが, すでに述べたようにこの部分は摩擦面の状況, 摩耗量などにおいて, あとの摩擦係数や摩耗量のほぼ一定した部分と摩耗機構上本質的にちがうと思われるので, ここでは無視することにする。すなわち図 13, 14, 15 では, Au を除いて横軸に摩擦係数急増後のすべり距離をとって, それに対応する摩耗量を示している。

図に見られるように, この補正したすべり距離と摩耗量との関係は, Ni, Cu, Au のいず

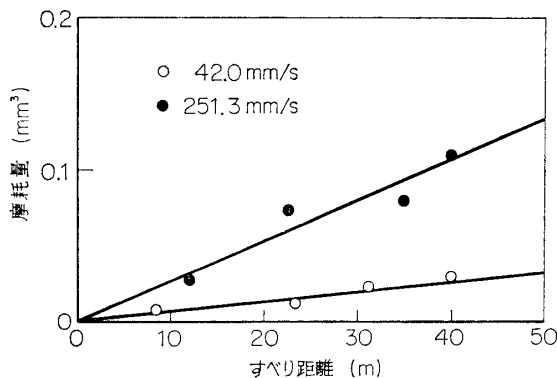


図 13 Ni/Ni, 摩耗量とすべり距離との関係 (ただし実験はすべて  $(3 \pm 2) \times 10^{-6}$  mm Hg 中のもの)

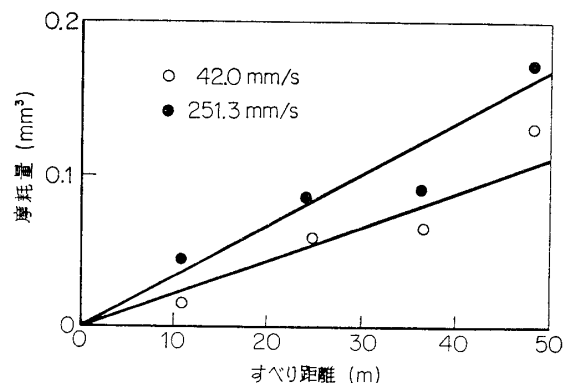


図 14 Cu/Cu, 摩耗量とすべり距離との関係 (ただし実験はすべて  $(3 \pm 2) \times 10^{-6}$  mm Hg 中のもの)

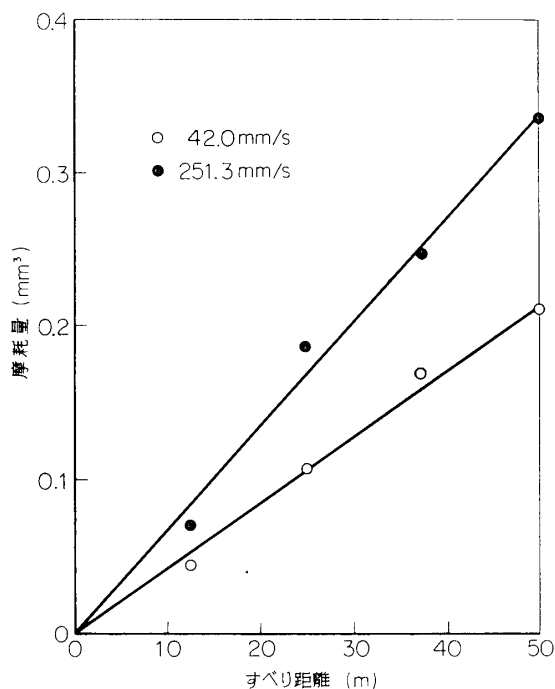


図 15 Au/Au, 摩耗量とすべり距離との関係  
(ただし実験はすべて  $(3 \pm 2) \times 10^{-6}$  mmHg  
中のもの)

れにおいてもこう配は異なるがほぼ直線関係にあることが認められる。前報 [1] では摩耗形態を付着・非付着の 2 域に分類しており、すべり距離と摩耗量との関係が非付着域では直線的であり、付着域では最初摩耗量の増加のきわめて小さい部分があったのちに直線関係に移行することを述べた。前報の条件を機械的に本実験にあてはめると、Ni の 42.0 mm/s のみが非付着域に属し、ほかはすべて付着域に入るのであるが、本実験においては図に見られるとおり、すべり距離の補正を行なったあとでは付着・非付着域には関係なく直線的関係が認められる。しかしながらデータも若干ばらついているので、この点に関して詳しく論ずるためにはもう少し多量のデータが必要であろう。

### 3.2.2 摩耗量とすべり速度との関係について

各金属の摩擦において得られた摩耗量とすべり速度との関係は図 10, 11, 12 に示した。ここでは摩耗量の尺度として 3.1.2 項で述べた摩擦係数急増以後のすべり距離 50 m 当たりの摩耗量を用いたが、前項で述べたようにすべり距離と摩耗量とは比例関係にあると認められるので、この値の大小はそのまま単位すべり距離当りの摩耗量の大小の比較とみなしうるものであり、以下その意味で議論する。

ここに示した三つのグラフを見ると、いずれも上に凹な曲線が得られているのが特徴的であるが、これはすでに前報で述べたと同一の傾向である。すなわちすべり速度のある値を境（極小値）として摩耗量は増加するのである。この境界のすべり速度は、ばらつきのため明確には定めがたいが、Ni で 60 mm/s, Cu 125 mm/s, Au で 80 mm/s 程度である。

ところで、筆者らが試験片材料に Au を加えたのには一つのねらいがあった。それは Au に対する酸素の化学吸着熱が負であること、すなわち化学吸着がおこらない Au ではどうなるかということである。化学吸着がおこらなければ、空気中あるいは真空中において、金属面を保護するような被膜は生じないはずである。事実この点は 3.1.2 項に述べたような摩擦係数とすべり距離との関係から確かめることができた。したがって諸条件を変化させて実験を行なったときにも、Au のデータだけは潤滑作用の変化をこうむらないはずであり、これと比較することによって、他の金属におけるふん囲気の潤滑作用を知ることができるであろう。

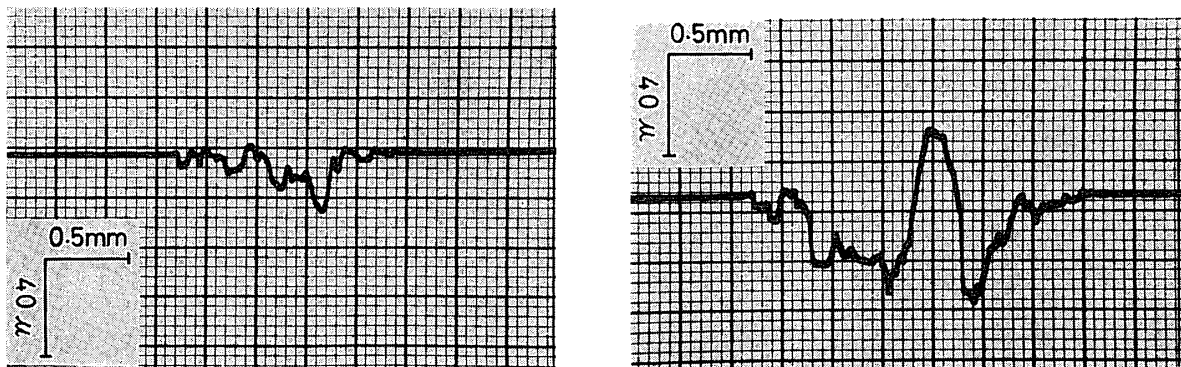
さてこの観点から図 12 を見ると、Au においても、と云うより Au においてむしろ著し

く摩耗量のすべり速度に対する変化が現われている。この事実は、この図のような摩耗量の特性が、筆者らの考えているふん囲気の潤滑効果、すなわち酸素の化学吸着膜の潤滑以外の因子によるものであることを示している。

このような結果は、前報のそれとかなり異なっている。すなわち本実験において 3 種の金属のいずれについても認められた。速度が上昇するにつれて摩耗量の減少する領域は、前報では遷移金属の空気中における摩擦においてのみ認められており、これを非付着域と呼んで他の領域（付着域）と区別したのである。しかしながら両実験結果間に見られるこの差異については、定性的にはつぎのような説明が可能である。前報においては付着域と非付着域とを区別する最も著しい特徴として、摩耗粉の生成過程を指摘した。すなわち付着域においては表面の一部がせん断されてちぎれたとすると、それはただちに 2 固体内のどちらかに再付着し、これが接触面内で雪だるまのように成長してのちはじめて摩耗粉として系外へ放り出されると考え、Archard 流の一般的な凝着摩耗を生ずる非付着域に比べて、結果として観測される摩耗量が著しく少なくなることを説明した。ところでこのような現象が可能であるためには、上に述べたような表面の一部がせん断されたもの、すなわちまだ測定にかからない摩耗粉がしばらくのあいだ摩擦面間に存在することが必要になる。しかしながらこのような現象は、前報のように円板状試験片の摩擦面が上を向いている場合には容易におこりうるが、本実験のようにそれが下を向いている条件ではきわめておこりにくいであろう。したがって本実験において面の状態が前報のような意味で付着域に相当している場合にも摩耗粉の再付着が比較的少なく、これが実験結果に見られる前報との差の、一つの大きな原因になっているものと思われる。なお、前報においても摩耗量の速度特性を示す曲線の形自体は必ずしも十分に説明されておらず、この点に関連した定量的な解析は続報にゆずりたい。

### 3.2.3 すべり速度に伴う摩擦面・摩耗粉の変化について

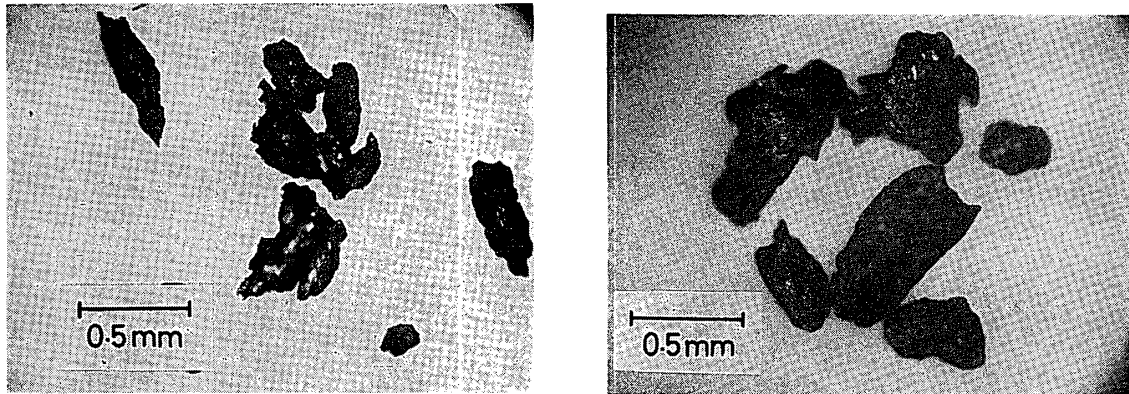
触針式測定機で得た摩擦面の荒れ具合の例として、Ni のすべり速度 42.0 mm/s および 251.3 mm/s のものを図 16 に示す。すべり速度の増加に伴って前者は摩耗量の減少する領域、後者は増加する領域の例である。金属によりその面の荒れ方の差はあるが総体に速度の増加に伴って面の荒れはひどくなる。しかし上述の二つの領域に対する判然とした差はみら



(a) すべり速度 42.0 mm/s

(b) すべり速度 251.3 mm/s

図 16 Ni 同士の場合の円板試験片上の摩耗痕  
(ただし実験はいずれも  $(3 \pm 2) \times 10^{-6}$  mmHg 中のもの)



(a) すべり速度 21.0 mm/s

(b) すべり速度 251.3 mm/s

図 17 Ni 同士の場合の摩耗粉  
(ただし実験はいずれも  $(3 \pm 2) \times 10^{-6}$  mmHg 中のもの)

れないようである。Au と Cu の実例は図に示してはいないが、それらについてもやはり同様のことがいえる。

図 17 に摩耗粉の写真を示す。前述の摩擦面のあらさに対応して Ni のすべり速度 21.0 mm/s のものと 251.3 mm/s のものを示してある。摩耗粉についても面の荒れと同様なことがいえ、低速では細かな針状ころのようなものが多く見られるが、すべり速度の増加に伴って大粒で形も不整のものになる。ここでも両領域間に判然とした区別は見られないようである。

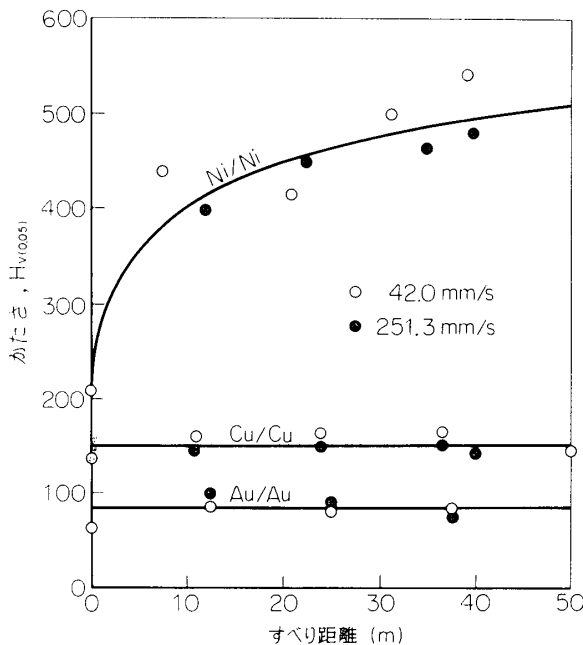


図 18 かたさとすべり距離との関係  
(ただし実験はすべて  $(3 \pm 2) \times 10^{-6}$  mm Hg 中のもの)

### 3.3 摩擦面のかたさの変化について

摩擦面の加工硬化の進行状態を知る目安として、摩擦痕表面のかたさを測定した。測定には寺沢式微小ビッカース硬度計を用い、荷重 50 g で行なった。

かたさとすべり距離の関係を示すものが図 18 である。前にも述べたように Cu, Au の両試験片は実験前すでに十分塑性加工を受けた状態のもので、かたさの変化は Ni と Cu, Au とでかなり異なっている。すなわち Ni の場合、摩擦面のかたさはすべり距離の増加とともに指数曲線的に増加しており、500 kg/mm<sup>2</sup> 付近で飽和している。他方、Cu, Au の場合には、その摩擦面のかたさは摩擦の進行によってほとんど影響を受けていない。また図の中で白丸はすべり速度 42.0mm

/s ですべり速度の増加に伴って摩擦量の減少する領域に属するもの、黒丸はすべり速度 251.3 mm/s で逆に摩擦量の増加してゆく領域に属するものである。前述したように、摩擦量、摩擦面の荒れ、摩耗粉の形状などはすべり速度によっていずれもかなり変化しているが、図からわかるとおり、Ni, Cu, Au の 3 種共にすべり速度のちがいによるかたさの差はほとんど認められない。

#### 4. む す び

大気中～真空中、室温～液体窒素温度における金属の摩擦と摩耗をしらべる目的の研究のうち、本稿ではその第 1 報として、Ni, Cu, Au の真空 ( $10^{-6}$  mmHg) 中、常温における実験結果を、装置の紹介に共に報告し、前に著者の一人らが報告した類似の実験結果などと比較して考察を加えた。概要の欄にまとめたように、得られた結果は問題の解答というよりも、問題点がどのようなものかを明らかにしたにとどまっており、今後の研究にまつところが多い。

なお、本実験装置の設計にあたっては、東京工業大学笹田 直助教授のご尽力が大きく、また試験片材料に関し本所堀内 良助教授のご助言をいただいた。ここに礼申しあげる。

1969 年 12 月 1 日 原動機部

#### 参 考 文 献

- [1] 曾田範宗, 笹田 直: 航空研究所集報, **4** (1964), 49.
- [2] E. D. Tingle: Trans. Faraday Soc., **46** (1950), 93.
- [3] E. Rabinowicz: ASLE Trans., **10** (1967), 400.
- [4] M. Antler: ASLE Trans., **5** (1962), 297.
- [5] 里吉超, 葉山房夫: 日本金属学会誌, **32**, 1 (1958), 11.
- [6] 里吉超, 葉山房夫: 日本金属学会誌, **32**, 12 (1958), 1322.
- [7] F. P. Bowden & T. P. Hughes: Proc. Roy. Soc. A, **172** (1939), 263.
- [8] D. H. Buckley & R. L. Johnson: NASA TN D-1708 (1963).
- [9] T. Liu: Wear, **7** (1964), 163.
- [10] C. E. Moeller & M. C. Noland: ASLE Trans., **10** (1967), 146.
- [11] R. D. Brown & R. A. Burton: Trans. ASME, F, **89** (1967), 425.
- [12] D. Tabor: Proc. Roy. Soc. A, **251** (1959), 378.