

動摩擦中に生じるスライダーの微少跳飛

河野 彰夫*・伊東 正男**・大藪 英雄**・曾田 範宗*

* 理化学研究所摩擦工学研究室 〒 351 埼玉県和光市広沢 2-1

** 日本粉末合金(株) 〒 100 東京都千代田区有楽町 1-4-1

(1981年11月2日受理)

Small Jumping of Slider in Sliding Contact

Akio KOHNO*, Masao ITOH**, Hideo OHYABU** and Norimune SODA*

* Friction and Lubrication labo., The Institute of Physical and Chemical Research, Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351.

** Japan Powder Metallurgy Co., Ltd., Yuurakucho, Chiyodaku, Tokyo 100.

(Received November 2, 1981)

Small jumping of a slider under various sliding conditions has been observed. The results of measurements of the contact resistance during sliding contacts indicated that many small jumps occurred during ordinary sliding contact. The mean duration of the jumps was about 3 milliseconds, their mean frequency increased with increasing sliding velocity. The number of jumps was roughly proportional to the real sliding distance, about 10^3 jumps per 1 meter of sliding. The ratio of non-contact vs. contact time increases with increasing sliding velocity and easily exceeds 75% under ordinary sliding conditions. The mean duration of real contacts decreases from 4 milliseconds to 1.6 milliseconds with the increase of the non-contact ratio.

The wear sustained by the specimens (sintered-metal pins and copper rings) were also measured, in the form of the difference in weight before and after sliding. The results indicated that the non-contact ratio has little influence on the specific wear rate. Despite the short mean contact time, Holm's law of adhesive wear is found to be appropriate for such sliding conditions as those in which the jump frequency is high.

1. はじめに

定荷重で接触しながら、定速ですべるという仮想的な動摩擦条件が、きわめて実現しにくいことは良く知られている¹⁾。電車のトロリー線とパンタグラフすり板であるとか、非常用ブレーキなど、強制的に相対すべりをおこなう機械部品では、必ず、なんらかの形態の非定常すべりが生じて、離線アークとかブレーキ騒音の原因となる。この種の問題の系統だった研究例は、現在に至るまで、ほとんど試みられていないが、その非定常すべりの計量化の例として、離線率を測定する方法がある²⁾。これは動摩擦中に生じるスライダーの小跳飛を、接触抵抗

の変化により計測して、その発生頻度を動摩擦条件の非定常性の評価として用いようという試みである。現在までのところ、この方法も完成されたものとは言い難いが、今後、非定常すべりの、ある側面を代表する因子として一考の価値は、あるのではなからうか。

2. 実験方法

2.1 動摩擦実験装置

実験室内で、安定した連続すべりをおこなわせる機構は、回転体を利用したものが多い³⁾。本研究で利用した。実験装置も回転円筒の側面をすべり面として利用しており、ピン-円筒型摩擦実験装置と呼ばれる型式であ

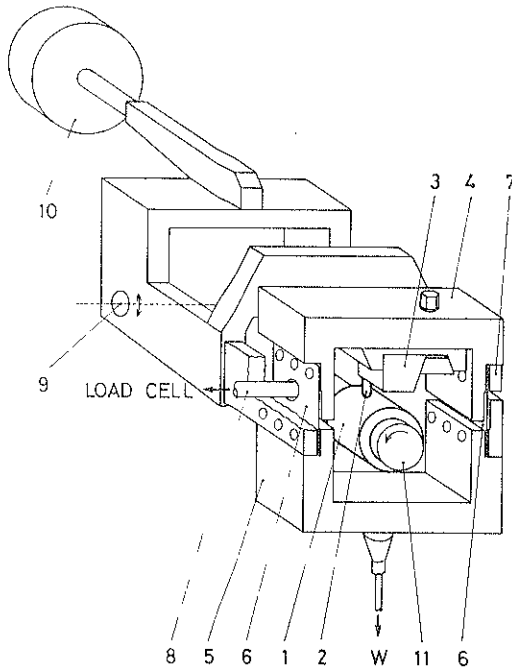


Fig. 1 Main structure of sliding contact tester (pin-ring type). 1, Ring specimen (40 mm ϕ x 25). 2, Pin specimen (5 mm ϕ x 20). 3, Pin holder. 4, Upper frame. 5, Lower frame. 6, Sheet spring. 7, Holder of sheet spring. 8, Push rod. 9, Fulcrum. 10, Balance weigh. 11, Rotating shaft.

る。**Fig. 1** にその主要部を示した。図中に No. 1 で示した円筒が、外部のモーターによって所要の回転速度で回転し、No. 2 で示した先端を径 5 mm ϕ に仕上げたピン試験片との間ですべり接触をおこなう。円筒試験片の外径は 40 mm ϕ で、モーターにとりつけた変速器によって 0.01 m/s から 1.0 m/s 程度の範囲ですべり速度を変化させることができる。ピン試験片 No. 2 はピンホルダー No. 3 によって上部フレーム No. 4 に取り付けられ剛性の低い板バネによって下部フレーム No. 5 と接続されており、プッシュ、ロッド No. 8 の左方に取り付けられたロードセルによって、接触点に作用する接線方向の相互作用（摩擦力）を検出できる機構になっている。下部フレームから No. 10 のバランス、ウェイトまでは、ほぼ一体の剛性の高い構造になっている。支点 No. 9 を中心に前後に自由に回転できる構造になっている。ピン試験片直下につり下げられたおもりによって、試験部分に所要の接触力を与えることができる。本研究ではリング試験片材料として、純銅 (Cu, 99.90%) を使い、ピン試験片材料としては青銅系焼結合金 (10% Fe, 3% Ni, 3% C, 残り 10% 青銅, 重量比) を用いている。

この材料組み合わせは、日本国有鉄道で現用されているトロリー線とパンタグラフすり板材に相当したものである。リング径は 40 mm, 長さは 25 mm で、ピンは長さ 20 mm, 直径 5 mm で、先端を半球状に仕上げている。

2.2 スライダの跳飛の観察

Fig. 1 の装置を用いて動摩擦実験をおこないながら **Fig. 2** のような通電回路によってピン・リング間に直流電流を通電しながらピン・リング間の電流、電圧の時間変化をオシロスコープで観察した⁴⁾。**Fig. 3** にその 1 例を示す。写真から明らかなようにすべり接触中に、しばしば、2 試料が離れて電流が流れない状態が出現している。図中では、6 回の跳飛が観察されている。通電条件は、電源電圧 DC 4.6 V, 負荷抵抗 1.15 Ω である。単位跳飛の時間は 0.3 ms $\sim$ 3 ms まであり、すべり速度が 0.1 m/s であるから、水平に飛んだ飛距離は 0.03 mm $\sim$ 0.3 mm となる。この間を仮に放物運動で近似すれば跳躍高さは装置の慣性モーメントも考慮すれば

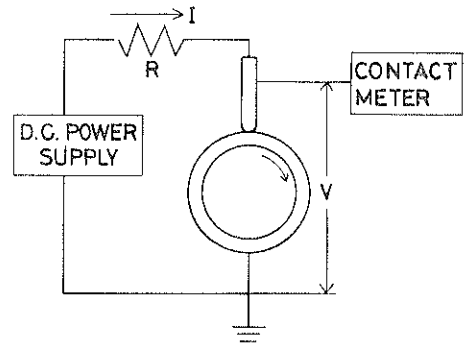


Fig. 2 Block diagram of measuring circuit.

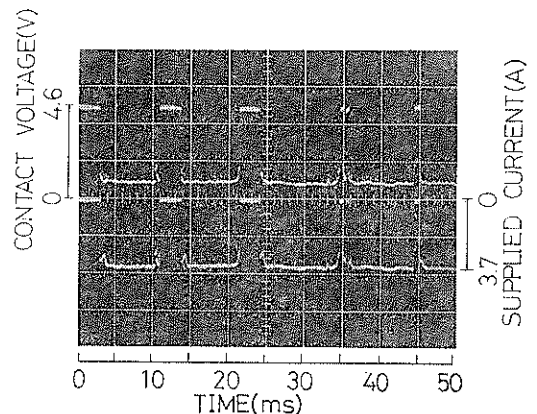


Fig. 3 Photograph of oscilloscope image that indicate the time dependency of the contact voltage and the supplied current.

1 μ m 以下という計算になり表面凹凸 (試験中に変化するが約 $R_{\max}=1\mu\text{m}$) と比肩できる微量である。

3. 離線率の測定

このスライダーの跳飛は多分に偶発的なものであろうから、その特徴をとらえるには何らかの統計的処理が必要となる。そこでとりあえず、パルス計測の手法を用いて、跳飛時間の全すべりの時間中で占める部分 (離線率) と跳飛の回数 (離線回数) を計測する回路系を製作して離線率と離線回数を測定して見た。測定回路系 (contact meter) については他の論文²⁾ に詳細を記してある。

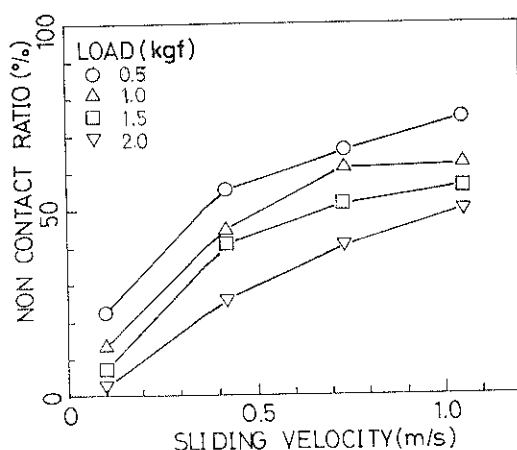


Fig. 4 The sliding velocity has much influence on the non contact ratio. Under any loading conditions, The increase of sliding velocity produces the increase of the non contact ratio.

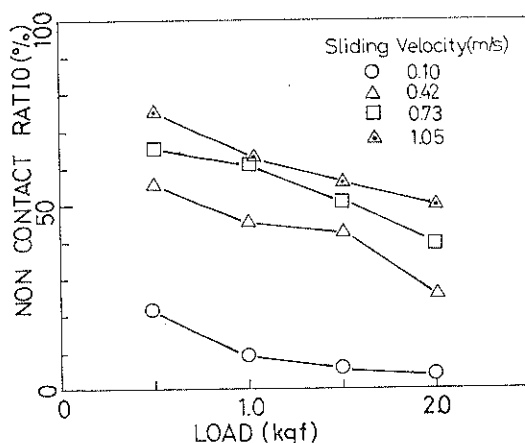


Fig. 5 The load dependency of the non contact ratio. They decrease with the increase of the load.

Figs. 4・5 はすべりの速度と荷重を変化させた場合の離線率の変化の測定例を示す。すべり速度の上昇とともに離線率は増大し、荷重の増加とともに減少していく。又、1.0 m/s 以下のすべり速度であるにもかかわらず、離線率は、最大 75% 程度に達し、全すべり時間での割合はかなり大きいと考えられる。本実験ではすべり距離を 500 m としているから、そのうち真に接触してすべっている距離は荷重 0.5 kg ですべり速度 1.0 m/s の場合には 130 m 程しか無く、残り 370 m はスライダーピンは空中に存在しており、リングと接触していない。

Fig. 6 は、荷重 1.0 kg の場合の離線回数のすべり速度依存性を示す。すべり速度 0.2 m/s 付近に全離線回数の極大が見られる。これは更なるすべり速度の増大が離線の急激な増加をもたらす真の接触時間を減少させ、跳飛の機会を減ずるためであろう。着線距離が 100 m に相当する離線回数を図中に点線で示した。すべり速度依存性はかなり薄いであり、ほぼ 1×10^6 回の近辺を上下する。つまり 1 mm の相対すべり距離に 1 回の割合で跳飛が起こり、すべり速度にはほとんど依存しない。又、それによってもなると跳飛の時間間隔は、すべり速度の逆数に対応して短くなっていく。この結果は、スライダーの跳飛が、スライダーの支持系の振動に起因するとする考え方では説明が付きにくい。つまり、支持系等の振動で決まるものならば、跳飛の時間間隔が、むしろ一定

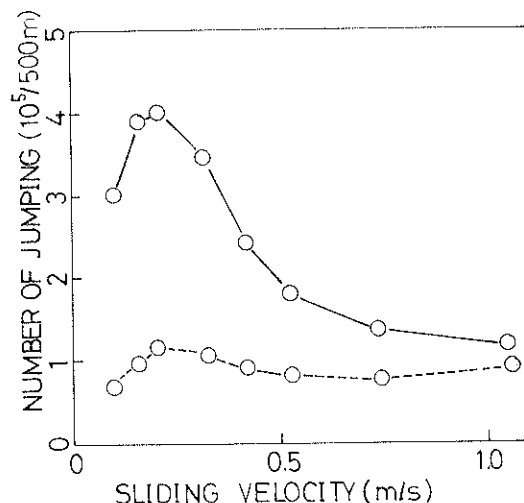


Fig. 6 The total number of slider-jumpings per 500 meters sliding. It appears that the sliding velocity has some influence on the number, but if the real sliding distance is identical, the sliding velocity has little influence on it. The dot line indicated the number of jumpings per 100 meters real sliding.

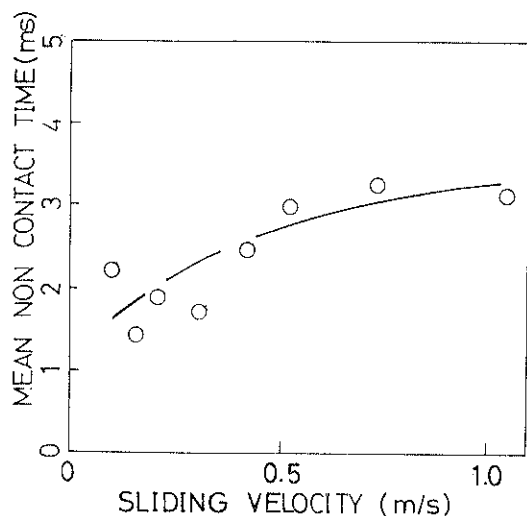


Fig. 7 The velocity dependency of the mean duration of non contact.

になると思われるが、実験結果は、すべり距離依存性を示している。この結果は、跳飛の原因が、リングのすべり面の表面性状にあることを示唆しているが、詳細は今後の課題である。Fig. 7 は、平均跳飛時間の測定例を示す。荷重 1 kg の場合、平均跳飛時間は 2 ms 程度から 3 ms 程度まで、すべり速度の増大に従ってゆるやかに増加していく。

4. 跳飛現象の摩耗への影響

このようなスライダの跳飛が、電車のトロリー線とパンタグラフすり板のような集電しながらすべり接触する機械部品の摩耗に重大な影響を及ぼすのは想像できる^{5),6)}が、通常の機械摩耗への影響はどうであろうか。実質のすべり距離に影響を与えるから影響はあるはずだという考え方もあり、平均の力積は変らないから変化しないという見方もあり得る。機械摩耗に接触面積、すべり距離に対する線形性を仮定すると、摩耗量とすべり距離、荷重の間に次のような式（ホルム則）が成立する⁷⁾。

$$W = kPL \quad (1)$$

P は荷重、 L はすべり距離、 k は摩耗量では材料組み合わせ、潤滑状態などで決まる定数である。この式は、 P 、 L とも見かけの荷重と見かけのすべり距離で表現されているが、それを真の荷重（動荷重） F 、と真のすべり距離 l に対してそのまま使用できるか否かに関して、過去に言及した文献は見当らない。そこで、上記の離線率を測定した条件で 500 m しゅう動後のスライダーピンとリングの重量減少を測定して、その離線率依存

性を Fig. 8 に示した。 y 軸の単位は、摩耗体積を見かけの荷重 P と見かけのすべり距離 L で除した値（比摩耗量）で表現している。式(1)が成立すれば、 y 軸の値は、材料組み合わせ、および潤滑状態を示す定数 k に等しくなるが、Fig. 8 の結果はそれを裏づけている。いま、離線率 β として真の接触力の平均を F とすれば、もし(1)式が動荷重と真の接触距離に対しても成立するとすれば、摩耗量は次の

$$W = kFL \quad (2)$$

(2)式で表現できるが、この式に $l = L(1 - \beta)$ 、および、 $(1 - \beta)F = P$ （ピンの重心が一定位置に留まる。）という関係を用いると、

$$W = kFL(1 - \beta) = kPL$$

すなわち摩耗量 W は離線率 β に無関係となる。Fig. 8 は、この計算結果を裏づけていると思われる。

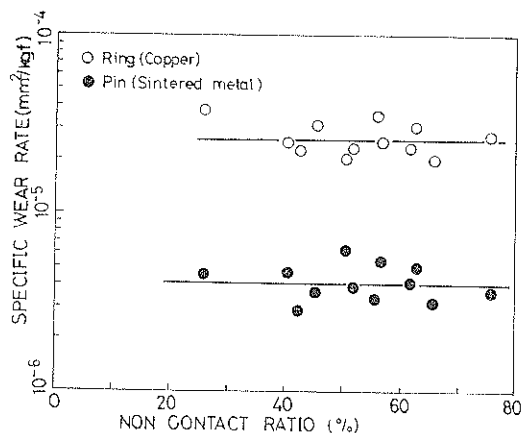


Fig. 8 The obtained specific wear rate of copper ring and sintered metal pin. Both of them scarcely depend on the non contact ratio.

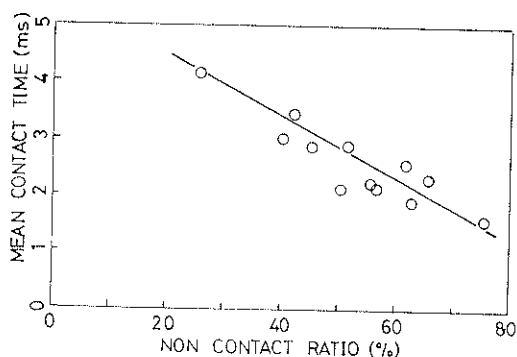


Fig. 9 The mean duration of the real contact decreases from 4 millisecc. to 1.6 millisecc. with the increase of the non contact ratio.

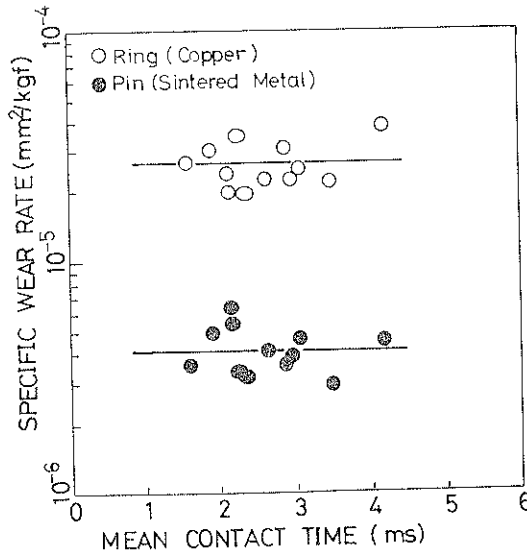


Fig. 10 Both specific wear rate of copper ring and sintered metal pin scarcely depend on the real contact.

Fig. 9 に、離線率に対する平均の接触時間を示した。離線率が20%程度の時、平均接触時間は4ms程度であり、離線率の増大とともに、減少して、75%の離線率に対しては1.6ms程度となる。つまり、この程度の短時間の接触に対しても、摩耗量はホルム則(1)に従っていることになる。Fig. 10 に、横軸に平均の接触時間、たて軸に比摩耗量をとって実験結果を図示した。Fig. 7 の結果から予想されるように、平均接触時間が変化しても比摩耗量は影響を受けない。銅と銅の弾性衝突に要する時間は約0.8ms程度である⁸⁾ことも考えると、本実験ですべり接触の、平均の接触時間のオーダーは10倍程度大きい。この程度(ms)の持続時間の接触

であれば、準微視的に見てホルム則で仮定した線形性が保持されているという結果である。

5. おわりに

通常は、定常すべりとしてとりあつかわれる動摩擦が、実は無数のスライダの小跳飛を含んだ、非定常すべりであることを、接触抵抗の動的測定によって明らかにした。1m/s程度のすべり速度でも、離線率は容易に75%にも達する。そのため、単位すべりの持続時間は1.6~4ms程度であり、それがくり返されて見かけ上の長時間すべりを構成する。このようなスライダの跳飛の原動力がどのようなものでありその頻度がどのような物理的条件で決定されるかという問題に関しては、今後に残された部分が多い。

本研究を遂行するにあたり、有益な助言をいただいた理化学研究所主任研究員、笹田直博士、およびContact meterを試作して下さった当所研究員、岩本正哉博士に厚く感謝いたします。

文 献

- 1) F. P. Bowden and L. Leben; Proc. Roy. Soc., **A 169** (1939) 371.
- 2) 河野彰夫, 岩本正哉, 大藪英雄, 曾田範宗: 応用物理, **50** (1981) 506.
- 3) 日本潤滑学会編: 潤滑ハンドブック (1970) 養賢堂, p. 89.
- 4) 河野彰夫, 大藪英雄, 曾田範宗: 潤滑, **26** (1981) 562.
- 5) 河野彰夫, 大藪英雄, 曾田範宗: 潤滑, 掲載予定.
- 6) 河野彰夫, 大藪英雄, 曾田範宗: 潤滑, 掲載予定.
- 7) R. Holm: Electric Contacts, Springer, Berlin (1967) p. 232.
- 8) F. P. Bowden and D. Tabor: "The Friction and Lubrication of Solids" (Part 1), Clarendon Press, Oxford (1950) p. 268.