

超高真空摩擦試験機による二、三の実験結果について

木村好次・岡田和三・神谷荘司

Some Preliminary Results with a High-Vacuum Friction and Wear Machine
By

Yoshitsugu KIMURA, Kazumi OKADA and Soji KAMIYA

Abstract: A high-vacuum friction and wear machine and a wear particle analyzer are described which were recently installed to study tribological behavior of materials in high vacuum to 10^{-8} Pa. Results of a series of preliminary experiments with copper and stainless steel are presented, which show a general decrease of the amount of wear despite the increase in the mean diameter of wear particles in the reduced pressure range.

概 要

高真空における摩擦・摩耗現象をしらべるために最近設置した、超高真空摩擦試験機と摩耗粉解析装置を紹介し、銅とステンレス鋼 SUS 304 について得られた予備実験について述べた。高真空域においては、摩耗粉粒径の増大にもかかわらず摩耗量が減少することなど、若干の興味ある結果が得られている。

1. はじめに

宇宙・特殊環境工学総合研究の一環として、筆者らの潤滑学研究室においては、高真空における摩擦・摩耗現象の研究を進めている。

このテーマは、トライボロジーの研究において2つの意味をもっている。その一は、基礎研究としての意味である。われわれの身近にある諸機械の摩擦面、特に金属の摩擦面は、酸化膜などの比較的厚い表面膜で覆れているのが通例であり、また潤滑剤によって意識的に表面膜を形成させることも広く行われている。摩擦・摩耗現象にはそのような表面膜の影響が大変強く現われるから、実用に関連の深い研究が、それらで覆われた表面に関する実験に基礎をおいて進められることには意味があるとしても、摩擦・摩耗の機構を明らかにするためには、それらの影響を除外した実験的研究が必要であり、高真空における実験にはこの面から期待するところが大きい。

いま一つの意味は、宇宙環境における潤滑方法、すなわち摩擦・摩耗の軽減法に関する、

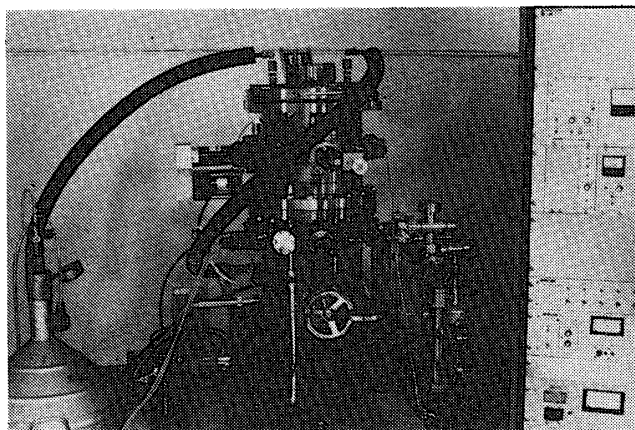
やや実用的な研究としてのものである。かかる研究にはその性質上、企業で行われるべき性格のものとも考えられるが、宇宙環境における潤滑は、トライボロジーにおいていわば例外的な問題であり、その技術的波及効果も限られたものである。このような事情から、宇宙産業の市場が比較的広いアメリカを別にして、この分野の研究はもっぱら公的機関に委ねられているのが現状である[1]。

ところで上述した基礎研究は、かつて筆者らの研究室において行った、無潤滑状態における金属の摩耗に関する研究[2]～[5]の、一つの発展として位置づけられるものである。そこでは、大気圧～ 4×10^{-4} Paにおける金属の摩耗を取上げ、一般に摩耗量としてとらえられるものを、摩耗粉の粒度と数とに分けて解析し、機械的因子の影響と雰囲気の影響とを分離することにより、摩耗を微視的な疲れ破壊現象として説明した。今回の研究においては、実験範囲を拡大して、 4×10^{-8} Paに至る高真空において摩擦・摩耗特性をしらべることに、摩耗粉の粒度の解析をより正確に行うことに第一の目的をおき、昭和54年度に超高真空摩擦試験機と摩耗粉解析装置を設置した。本報ではそれらの概略を述べ、これまでに得られた若干の結果を紹介する。

2. 超高真空摩擦試験機

本試験機は、いわゆるオイル・フリーの高真空中において摩擦・摩耗の実験を行うもので、日電アネルバ社に製作を依頼した。図1にその外観を示す。

排気系は、荒引系としてソーブションポンプを2個そなえ、これにより約5分間で $1 \sim 10^{-1}$ Paのオイル・フリーの低真空が得られる。また主排気系としてノーブルポンプ（イオンポンプ）、チタンサブリメーションポンプがあり、これらによって $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Paの真空が得られる。さらに真空槽内には液体窒素トラップおよびクライオポンプが設けられて



第1図

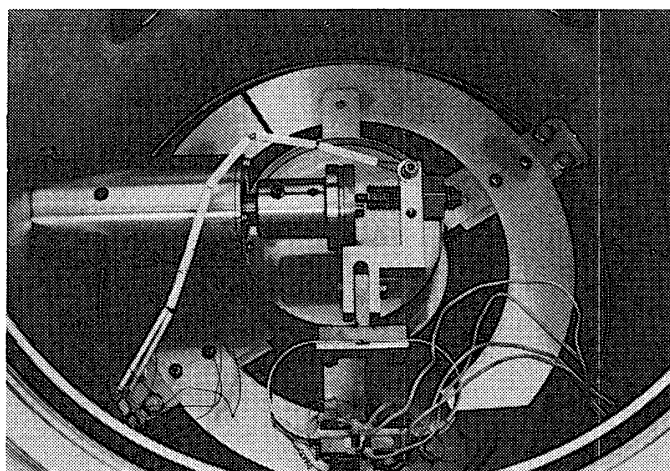


図2

いて、ベークアウト後これらを使用することにより、真空度は 7×10^{-9} Pa以下に到達する。なお現在までに当研究室においては、 1.6×10^{-8} Paまでの高真空が得られている。

真空槽内の圧力測定用に、2種類の真空計がそなえられており、サーモカップルケージにより $200 \sim 0.1$ Pa，ヌードイオンゲージにより $10^{-1} \sim 10^{-9}$ Paの範囲の測定が可能である。

摩擦は、横置きピン/円板方式によって行う。図2は真空槽内を上から見たところであって、左側の水平回転軸の先端に直径40 mmの円板が取付けられており、右側からその表面にピンが押付けられている。このような高真空中に回転を外部から直接導入するのは困難であるので、槽外に置かれたモータからマグネチック・カップリングを介して、円板型試験片を駆動する方式をとっており、最高回転速度300rpmまでで運転できる。

摩擦部の垂直荷重は、ピンの支持腕をピボットで支えベローズを貫通してその他端を真空槽外に出し、そこに死荷重を負荷することにより与えている。なお、この支持腕には図2中央下部に見られるように、薄板のリングを設けてあり、ここへ貼付した抵抗線歪ゲージにより、最大20 Nまでの摩擦力を検出することができる。

また、簡単なものではあるが、摩耗粉採集用の受皿を2枚そなえている。図2の中央に見られる円型のものがそれで、上部の1枚は外部からの操作で位置を変えられるようになっており、摩擦が定常状態になってからのみの摩耗粉を採集することもできるようになっている。

3. 摩耗粉解析装置

今回設置した、日本レギュレーター社製ルーゼックス401粒子計数器は、未だ十分とは言えないまでも、摩耗粉の測定を大層容易に、かつかなり高い信頼性で行えるものである。

測定は、ミリポア・フィルター(0.45 μ m)上に採集した試料について行う。真空中で得られる摩耗粉のように比較的大きな粒子から成る場合はそのままよいが、無潤滑の場合でも摩耗粉が細かい場合とか、潤滑油を用いた場合のように粒子が著しく細かく、かつ集ま

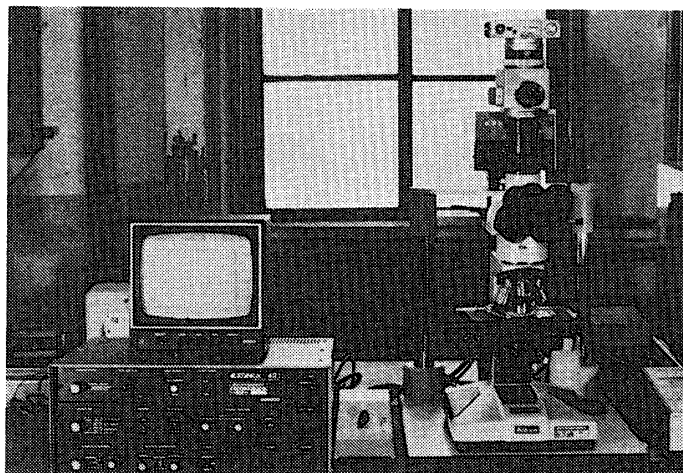


図3

り易い場合には、あらかじめ濾過した流動パラフィン等の中に懸濁させて超音波振動を与え、各摩耗粉を十分分離させたのち上記フィルター上に採集する。

本計数機の外観を図3に示す。まず摩耗粉をのせたフィルターを図3で見られる右方の光学顕微鏡で拡大して、その像をテレビジョンカメラによってビデオ信号に変換し、シェーディング補正回路により顕微鏡の照明むらやカメラの感度むらから生じる不均一な明るさを補正する。次にスレシホールド回路によりこの画像を2値化して、測定対象と測定対象外の濃度を完全に分離し、任意に設定した大きさ以上の粒子だけを、この2値化画像を計数回路によって選択計数する。図3の左下に見えているのがその画像処理システムである。この測定

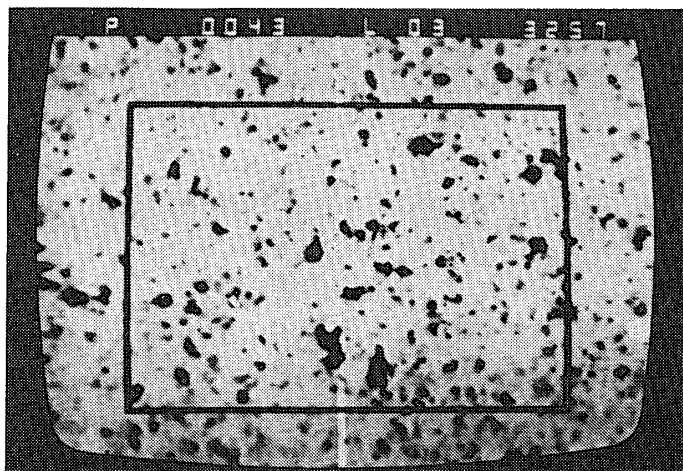


図4

中の像をモニタースクリーンにより観察できるため、これにより粒子の形状、あるいは誤差の要因となる粒子の重なりぐあいなどが直接調べられ、また混入した異物があればそれを識別することが可能である。図4は視野の一例であるが、モニタースクリーン中に適宜設定したフレームの中に存在する粒子のうち、任意の寸法以上の水平方向最大弦長をもつものの数、設定サイズ、フレーム内の面積が、モニター像上部にデジタル表示されている。これにより必要な粒度分布を知ることができる。またスクリーンの中央に縦に通っている明るい帯は、キャリブレーションのためのもので、その幅がこの場合の水平弦長 $3\mu\text{m}$ になっている。

4. 試験片・実験条件等

試験片は、純度99.99%の銅とSUS 304ステンレス鋼で、それぞれ同種のピン/円板間で摩擦・摩耗実験を行った。ピンの直径は4mmで、先端が摩擦面に対して 20° の斜面に落としてある。円板は直径40mmで、摩擦軌道の直径は31.8mmである。摩擦面はいずれも1200番のエメリー紙で仕上げ、溶剤洗浄および電解洗浄後試験機に取付けた。真空中での表面膜除去は行っていない。

摩擦係数は、実験を通してサーボ式記録計により連続的に記録した。また摩耗量は、ピンについては上述した斜面の寸法の変化から、円板については摩耗痕に直角に測定した表面あらさ曲線から算出した。摩耗粉は、すべり距離全体に亘って採集したものである。

以下のデータは、大気圧、 0.13Pa 、 $1.3 \times 10^{-7}\text{Pa}$ の3段階の圧力のもとで、いずれも荷重 2.94N 、すべり速度 $800\text{mm}/\text{min}$ の条件で得られたもので、すべり距離は銅の場合が100m、ステンレス鋼の場合が200mである。

5. 実験結果

実験結果を表1にまとめて示す。

表1 実験結果の概要

材 料	圧 力	摩擦係数	摩 耗 量 , mm^3			摩 耗 粉 平均粒径, μm
			ピ ン	円 板	合 計	
銅	大 気 圧	1.12	0.741	4.712	5.453	138.4
	0.13Pa	1.44	0.299	2.353	2.652	231.5
	$1.3 \times 10^{-7}\text{Pa}$	1.25	1.299	-0.742	0.557	139.4
ステンレス鋼 (SUS 304)	大 気 圧	0.56	0.153	0.101	0.254	2.7
	0.13Pa	1.10	0.050	0.020	0.070	69.6
	$1.3 \times 10^{-7}\text{Pa}$	0.53	0.049	-0.027	0.022	101.5

実験に先立って酸化膜の除去を行っていないので、いずれの場合にも摩擦開始時には、 $0.1 \sim 0.5$ 程度の摩擦係数を示す。しかしすべり距離にして約20mまでには、表面がそれぞれの圧力の下での平衡状態に達するようで、その後は周波数のかなり高い変動はあって

も、摩擦係数の平均値はほぼ一定した値を示す。表1に示したものはこの値である。いずれも中間の圧力において最も高い値をとっているが、それぞれ1回の実験であるので確言は差控えたい。

一方摩耗量を見ると、銅のピン側の摩耗量のみは不規則な変化を示しているが、他はいずれも圧力の低下に伴って摩耗量が減少しており、 1.3×10^{-7} Paにおいては、円板の体積は摩擦中に増加していて、摩耗量よりも移着量の方が大きいという結果になっている。摩耗量の総計は図5のように、圧力が下るほど減少しており、未だ変化の詳細は明らかでないが、既報[2]の結果と実験的には一致している。

前節に述べたスクリーン中の水平弦長で表わした、摩耗粉の各条件下における平均粒径には、銅の場合とステンレスの場合とで、かなり様子が異っている。既報[3]における銅の対応する結果を見ると、 $0.13 \sim 4 \times 10^{-4}$ Pa で得られた摩耗粉径は、大気圧中のその約1.3倍であって、この比は表1に見られる値と近い。ただしここでは、より低圧において再び摩耗粉径が減少するという結果が得られていて、これが系統的な変化であるのかどうかは、現在では判断しにくい。一方ステンレス鋼の摩耗粉は、圧力の低下に従って急激に大きくなっているのが明らかである。これらの結果から、圧力が低下すると摩耗粉は概して大きくなるが、それ以上に摩耗粉粒が少くなるために、摩耗量自体は減少することがわかる。

図6および7は、各条件の下で得られた摩耗粉の粒径分布である。銅の摩耗粉の粒径は、いずれも粒径の増加に伴って個数がほぼ単調に減少する分布を示しているが、ステンレス鋼

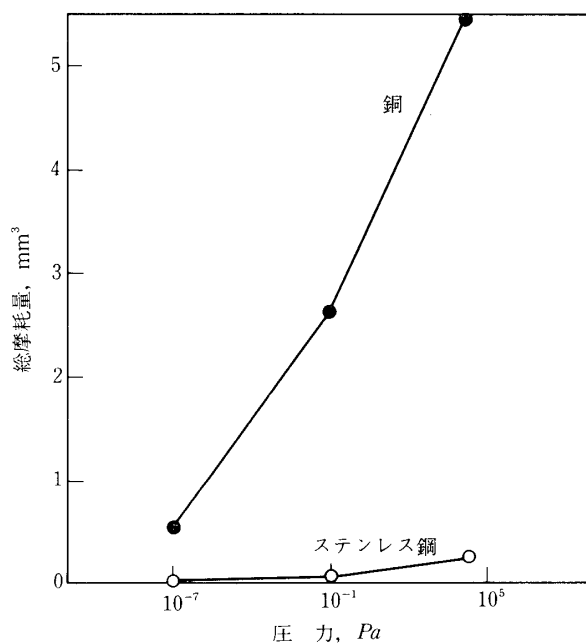
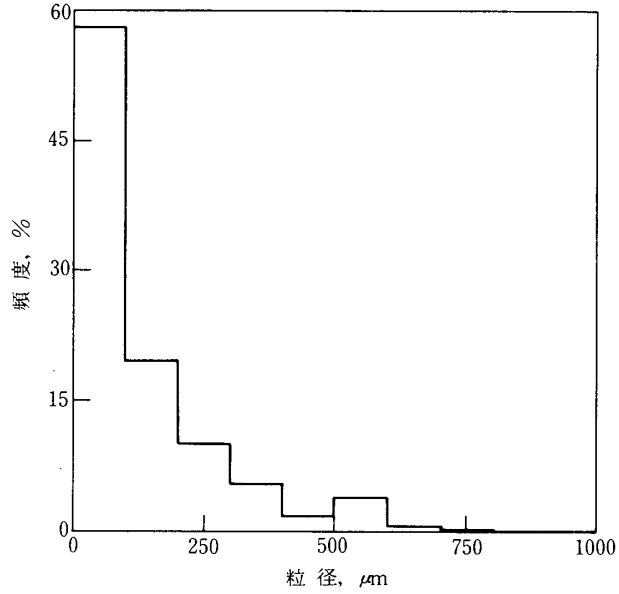
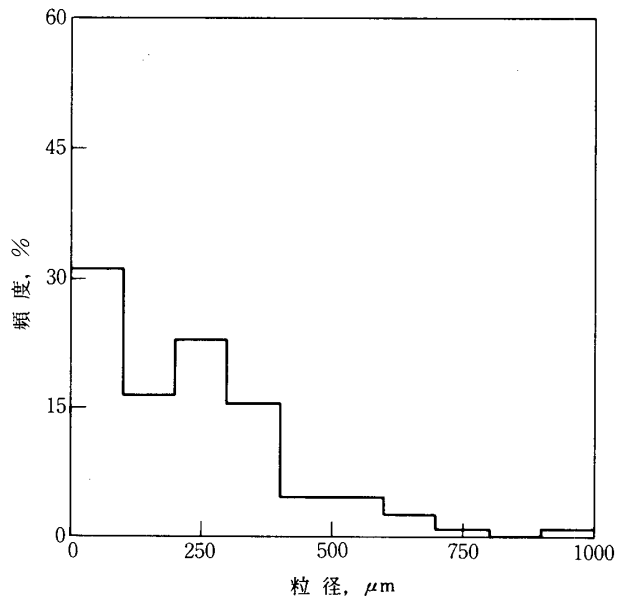


図5



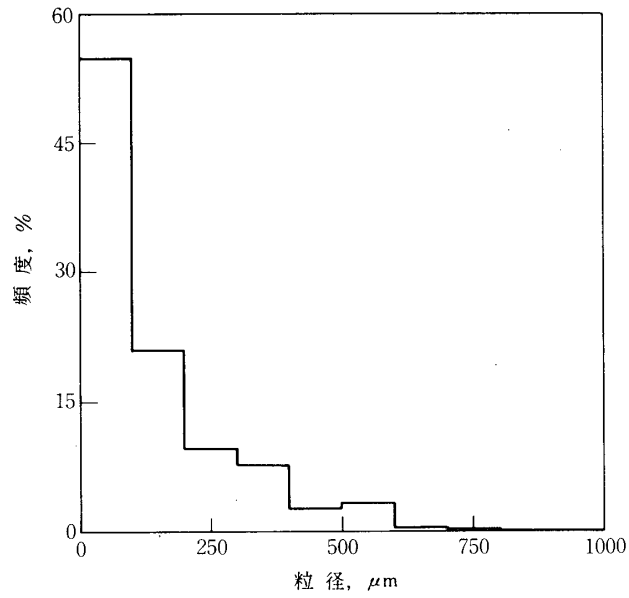
(a) 銅, 大気圧, 平均粒径 138.4 μm

図 6 a



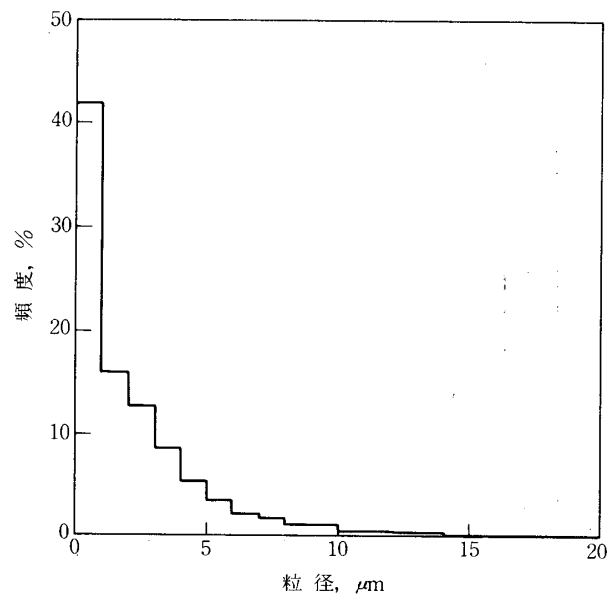
(b) 銅, 0.13 Pa, 平均粒径 231.5 μm

図 6 b



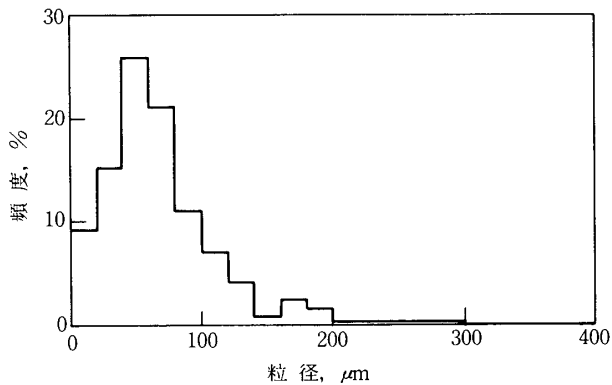
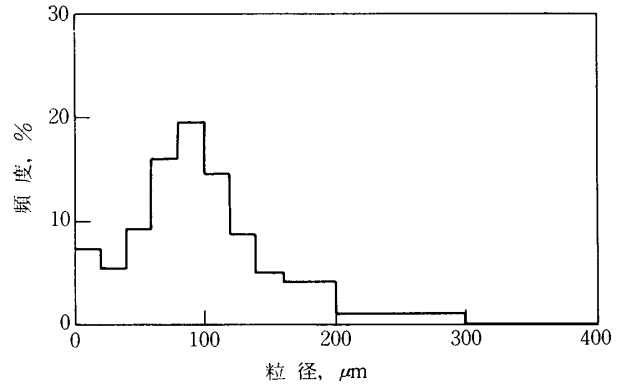
(c) 銅, 1.3×10^{-7} Pa, 平均粒径 $139.4 \mu\text{m}$

図 6 c



(a) ステンレス鋼, 大気圧, 平均粒径 $2.69 \mu\text{m}$

図 7 a

(b) ステンレス鋼, 0.13 Pa, 平均粒径 69.6 μm (c) ステンレス鋼, 1.3×10^{-7} Pa, 平均粒径 101.5 μm

の場合には、真空中において大きな摩耗粉の得られる場合に、極大値が平均粒径付近に現われている。

6. むすび

本稿では、新たに設置した超高真空摩擦試験機と摩耗粉解析装置の概略を述べ、銅とステンレス鋼による予備的な実験の結果を紹介した。未だ実験点が少ないために確言は差控えるべきところが多いが、

- (1) 大気中 비해、真空中では摩耗量が減少すること、
 - (2) 摩耗粉の平均粒径は、逆に大気圧中よりも真空中において増大する傾向を示すが、銅とステンレス鋼では変化の様相がかなり異なること。
- 等、若干の興味深い結果が得られた。

1980年12月8日 原動機部

参考文献

- [1] 木村好次：スペーストライボロジー研究会前刷集，東京大学宇宙航空研究所（1978）11.
- [2] N. Soda, Y. Kimura & A. Tanaka : Wear, 33,1 (1975) 1.
- [3] " " " : Wear, 35,2 (1975) 331.
- [4] " " " : Wear, 40,1 (1976) 23.
- [5] " " " : Wear, 43,2 (1977) 165.