620.194.4:534-8:678.6/.7

超音波振動法によるプラスチックの微動摩擦*

栗谷 丈夫**, 恒川 義徳**

Wear Tests of Plastics by an Ultrasonic Vibration Method

by Jōbu AWATANI and Yoshinori TSUNEKAWA

A special apparatus was constructed for tests of the wear on plastics, the essential part of which is a metal rod vibrating at a high frequency (18.3 kc). Certain experiments were carried out in the range from 140 to 560 g of the pressure of contact and from 25 to 75 μ of the amplitude of vibration. The amount of wear can be measured at any time of the duration of experiments. Polyethylene, Nylon-6 and Poly-vinyl-chloride were tested. Effects of load, amplitude, irradiation of γ -ray and other factors upon the wear are investigated. Speculation on the mechanism of wear for the results is done with help of the microscopic observation on sliding surfaces.

1. 緒 言

一般にプラスチックは比重が小さく、耐腐食性や吸振能が大きい上、砲金などよりもすぐれた摩擦特性をもつものがあるので、最近耐摩擦材としての研究が盛んである^{(1)~(4)}。しかし、プラスチックの摩擦現象はきわめて複雑で、種類によってはもちろんのこと、同一材料でも使用方法によって全く違った結果を示すことがあるために、種々な実験条件での資料が必要とされている。

ここでいう微動摩擦とは微小振動を行なう金属円筒とプラスチックの間の摩擦現象である。この方法は fretting corrosion (曾田⁽⁵⁾ はこれを微動摩擦と名づけている) と呼ばれる金属の摩擦試験の一種であるが、プラスチックについては予備的実験⁽⁶⁾ 以外はいまだ行なわれていないようである。通常のやり方では試験にかなりの長時間を要するので、われわれは超音波振動を利用した装置を試作し、二、三の材料について実験した。また顕微鏡観測を併用して、摩擦機構の考察なども行なった。さらに、放射線の照射がプラスチックの摩擦特性に及ぼす影響なども調べた。

2. 装 置

説明図 (第 1 図) に示すように摩擦円筒に生ずる超音波振動は磁わい振動によっている。図中の A はステンレス鋼 (13% Cr) でつくった摩擦円筒 (直径 2.5

mm) で、これが軸方向に一定の振幅で振動し試料面との間に摩擦摩擦を生ずる。この円筒は金属 ホーン B に、B はさらに磁わい振動子 C に接着している。

(摩擦円筒+ホーン) の基本共振周波数 (18.3 kc) を磁わい振動子のそれに等しくつくり、ホーンを振動の節部で冷却容器壁 D に固定しているから、C の振動はホーンの直径比に逆比例して拡大され A に伝達される。振動系での温度上昇をさけるために、図示のようにホーンの節部より左方は冷却容器に封入している。

この方法では構造上振動数は変えられないが、振動の振幅はだいたい 15~100 μ の範囲内で任意の値に保つことができる。

試験片 S は下図のように、ピボット・アーム E を経

第 1 図 説明図

* 昭和 34 年 3 月 20 日 関西支部第 34 期定時総会講演会および昭和 35 年 3 月 18 日 関西支部第 35 期定時総会講演会において講演、原稿受付。昭和 36 年 1 月 11 日。

** 正員、大阪大学産業科学研究所 (堺市北花田町 555)。

て おもり により一定の力で円筒に接触する。この装置ではおもりの重さ W と接触力 P との関係は

$$P=2.8 W \dots\dots\dots(1)$$

である。実験には $W=50\sim 200\text{ g}$ 、したがって $P=140\sim 560\text{ g}$ の範囲で種々に変えて測定した。

摩耗の進行とともにアーム E はわずかに回転するので、その端面に刻んだマーク M の変位量 l を実測し、それから摩耗量 L を次式から計算する。

$$L=1.392 l^{3/2} \text{ (単位 mm}^3\text{)} \dots\dots\dots(2)$$

このマークの変位量と摩擦円筒の振動振幅は第2図の外観写真でみられる2組の顕微鏡で実験中に随時測定できる。

この装置では高い繰返し数で試料を摩擦しているのであるから、接触面では著しい温度上昇が想像される。これをさけるために、摩擦円筒に直径1mmの小穴をあけ、毎分約300ccの冷却水を通した。写真中にみられるわん曲した管にはこの冷却水を放出するゴム管が通っている。接触面の温度を直接測ることができないので、この面の直下に銅-コンスタンタン熱電対を植込んで試料の温度を測定した。第3図と第4図はそれぞれポリエチレンとナイロンに対する結果であ

る。温度はだいたい30秒くらいで定常状態となり、それから多少の変動があってもほぼ一定の値に保たれている。円筒に冷却水を通して、接触面の温度は局部的には融点近くに達するものと想像されるけれども、試料母体の温度はそれほど上がっていない。

3. 試 料

供試材料はポリエチレン(呼称, Hi-zex; 三井化学工業会社製品; 比重, 0.96), 6-ナイロン(東洋レーヨン会社製品; 比重, 1.14) およびポリ塩化ビニル[筒中セルロイド会社製品, 可塑剤, ジ・オプチル・フタレート(di optil phthalate), 0, 5, 10 および20%含有]で、いずれも厚さ2mmの板状の成形品について測定を行なった。まず金型により第5図のように打抜き、紙やすり(#000)で表面仕上を行ない、それから残留応力の除去と、放射線の照射を行なったものについては遊離ラジカルの安定化とのために100°C, 2時間の熱処理をほどこした(塩化ビニルは、試料の製作と熱処理方法はこれと多少違っている)。ナイロンの試験片は乾燥容器に約5箇月間保存したものについて実験したのであるが、これと大気中に放置した試料(含水量, 約4.6%)の測定結果との間あまり差が見られなかったから、実験の途中からは、ナ

第2図 装置外観

図中の数字は振幅および接触力を示す

第3図 試料の温度上昇(ポリエチレン)

図中の数字は振幅および接触力を示す

第4図 試料の温度上昇(6-ナイロン)

第5図 試験片

鉄の吸湿性についてはあまり注意を払わなかった(実験誤差以内ではあるが、乾燥試料のほうがやや耐摩耗性に劣っていた)。

ポリエチレンは湿度にあまり影響されず、かつ基本的な高分子材料であるので、これについてはかなり多くの基礎的実験を行なった。ナイロンと塩化ビニルは単に比較試験のために測定しかけたのであるが、前者は特異な摩耗性質を示したので、これについてもかなりの測定を行なった。塩化ビニルは耐摩耗性がきわめて低かったので簡単な実験だけに止めた。

4. ポリエチレンの測定結果とその考察

4-1 摩耗特性 摩耗量が摩擦時間の経過とともにいかに変化するかを調べるために、振幅を $25\sim 75\mu$ 、接触力を $140\sim 420\text{ g}$ (荷重 $50\sim 150\text{ g}$)の範囲内でいろいろ変えて測定した。第6図と第7図はその一例で、前者は振幅を一定(40μ)とし接触力を変えたときの、後者は接触力を一定(196 g)とし、振幅を変えたときの摩耗-時間曲線を示している。

振幅の小さい場合は摩耗量は試験時間の初期にやや急に増加し、その後はゆるやかに変化する。この傾向

第6図 ポリエチレンの摩耗-時間特性
(接触力依存性)

第7図 ポリエチレンの摩耗-時間特性
(振幅依存性)

は荷重にあまり左右されないが(第6図)、振幅が大きくなるに従って、はじめの急に増加する直線的領域がしだいに長くなる(第7図)。この直線的領域は、摩擦時間のかわりに摩擦距離(時間×振幅に比例)について考えれば、さらに拡大する。かくして、大振幅では金属の微動摩耗の場合⁽⁶⁾のように初期摩耗状態を持続するようになる。

小振幅での特性曲線が直線的に増加しないのは、接触面積と圧力が時間の経過とともに変化する(一般の微動摩耗の欠点)ために起るのではないかと考えられた。しかし、それでは摩耗機構のあまり変らない(接触面の顕微鏡観察による)と思われる大振幅での直線特性を説明することができないから、ここでは金属の一方摩耗の場合⁽⁷⁾と同じように、すべり面に蓄積した摩耗粉の潤滑作用によって、小振幅でのわん曲した特性曲線が現われるものと推察される。振幅が大きくなるに従って、摩耗粉はすべり面から逃れやすくなるために、直線の変化をする初期摩耗の状態がしだいに長くなるのであろう。このことをさらに確かめるために、ホーン(第1図, B)の取付けを少し変えて、摩擦円筒にわずかな横振動を与えるようにして試験を行なった(この場合の円筒の振動は顕微鏡下ではきわめて細長い円形として観測される)。このようにして接触面から摩耗粉を脱離しやすくすると、小振幅でも第8図の×印のように直線的な特性が得られる(○印は直線往復振動による測定値)。

第9図は摩擦時間20分後の摩耗量と接触力との関係を種々の振幅について示したものである。金属の微動摩耗では摩耗量と接触力との間には $L \propto P^n$ のような簡単な関係が成立する⁽⁶⁾⁽⁸⁾。この実験結果もだいたいこのような関係で表わすことができるが、接触力 P の範囲が比較的せまいのと、指数 n の値が振幅によってかなり変わるので、上のような簡単な関係が成立するか否かについては確かな結論をくだすことはできない。

第8図 ポリエチレンの摩耗-時間特性

また, 第 10 図は一定の距離 (1130 m) を摩擦したときの摩耗量と振幅との関係を種々の接触力について示したものである。これら特性曲線の形は接触力によってあまり変わらないが, 摩耗量は振幅の増加とともに放物線的に上昇している。

4.2 放射線照射の影響 ポリエチレンは放射線の照射によって強化される, いわゆる架橋形のプラスチックであるが, これが摩耗特性に及ぼす影響についてはいまだ知られていないようであるので, 次の実験を行なった。試験片を2組に分け, 一方は空气中で, 他方はアンブルに封入し, 10^{-8} mmHg 程度の真空中に保って 10^5 レントゲンまで種々の線量の γ 線を照射

した。第 11 図はこれら試料についての測定 (振幅, 40μ ; 接触力, 196 g) の結果である。これからも明らかのように, 空气中の照射では線量とともに摩耗性質が著しく低下しているが, 真空中の照射では, 反対に非常に改善されている。このことからポリエチレンのような架橋形のプラスチックでも, 直接酸素に触れる表面近くは架橋よりもむしろ分解 (degradation) を起して劣化するものと思われる。とくに表面の性質に敏感な摩耗試験のような場合には劣化の傾向が著しく現われるのではないかと考えられる [ゴム弾性を現わす高温度域でのヤング率の測定からも, 空气中照射ポリエチレンの架橋度は真空中照射のものに比べて低いことが実証された (未発表)]。

5. 6-ナイロンの測定結果とその考察

5.1 摩耗特性 第 12 図は振幅を一定 (40μ) とし, 荷重を 50, 70, 100, 130, 150 および 200 g に保ったときの摩耗-時間曲線である。図から明らかのように, 接触力の小さいときと大きいときには, 摩耗量は時間とともに単調に増加するけれども, 中間の接触力では複雑な変化を示している。さらに注目すべきは, 接触力の増加とともに摩耗量がかえって減少することである。第 13 図はこの様相を明らかにするために, 20 分後の摩耗量と接触力との関係を第 12 図から求めて書直したものである。この結果から接触力の大きい場合と小さい場合で接触面に顕微鏡的な差異があるのではないかと考えた。第 14 図の (a) は接触力 196 g の, (b) は 560 g の, (c) は比較のためにポリエチレン (接触力 196 g) の接触面の顕微鏡写真である。ポリエチレンのすべり面 (c) は融点に近いパラフィンを摩擦したときに現われるような感じを与える条こんを示している (この模様は振幅や接触力が変化

第 9 図 摩耗-荷重関係 (ポリエチレン)

第 10 図 摩耗-振幅関係

第 11 図 γ 線照射の影響 (ポリエチレン)

してもあまり変わらない。しかし、接触力の小さい場合のナイロン (a) ではえぐり取られたような部分と摩擦条こんから成っている (すべり面のほとんどは前者の部分が写真に示したものよりもはるかに多く、この間に摩擦条こんが少しみられる程度である)。融点近くではナイロンは金属との親和力が強いので、接触面の微小部分がこの温度に近づけば、摩擦円筒に強く接着し、ナイロン母体が局所的にえぐり取られるものと思われる。したがって、このときの摩擦現象はナイロンの母体中に起り、円筒は摩擦しないことになる。これは発生する摩擦粉が白色をしていることから想像される。この摩擦粉は、融点の低いポリエチレンの場合のように有効な潤滑剤とならずに、すべり面から容易に脱離し、摩擦現象がはげしく起るのではないかと考えられる (第 12 図、曲線 1, 2 参照)。また、接触力 200 g 程度の低い接触力での摩擦試験においては、ナイロンのほうがポリエチレンよりも耐摩擦性に劣っていることや、摩擦による温度上昇が高いこと (第 3 図と第 4 図の比較) も以上のように考えれば容易に理

解される。

接触力の高いときのすべり面 (b) には摩擦方向に対して斜めに原因不明の条こんがあるが、(a) のようにえぐり取られたような こん跡 は見られない。接触力が大きくなるほど摩擦が起りにくくなる理由は明らかでないが、すべり面の温度も高くなるので、摩擦粉がしだいに潤滑作用をするようになるためではないかと考えられる。しかし、接触力が大きくなると白色粉とともに金属の酸化物と思われる かつ色 の摩擦粉も現われるので、摩擦現象は摩擦円筒でも起っているようにも考えられる。

中間の接触力では摩擦は最初ゆるやかに、後は急に増加する傾向がある (第 12 図、曲線 3, 4 参照)。これは摩擦の進行とともに、接触面積が増大し、その結果接触圧力が減少するためであろう。

接触力が増加するに従って摩擦量の減少する現象は、接触面の温度上昇によるものと思われたので、次に荷重を一定にして振幅を上げて同じような現象が現われるのではないかと考えた。第 15 図はこのような見地から行なった実験であるが、結果は期待に反している。振幅の増加は直接に摩擦量を増加する作用 (摩擦粉が接触面から脱離する確率はその移動距離に比例するものと考えられる) と温度上昇による間接的な摩擦量の減少との総合作用として働くものと思われ

第 12 図 ナイロンの摩擦-時間特性
(接触力依存性)

第 13 図 摩擦-荷重関係(6-ナイロン)

(a) ナイロン
接触力=196 g

(b) ナイロン
接触力=560 g

(c) ポリエチレン
接触力=196 g

第 14 図 振幅40 μm の場合の摩擦面の顕微鏡写真 (倍率 450)

るので、必ずしもこのような単純な期待は出現しなかったのであろう。

5.2 放射線照射の影響 真空中で γ 線照射をしたポリエチレンはたいへんすぐれた耐摩耗性を示したので、ナイロンについても同じような実験を行なった。しかし、期待に反し、第 16 図のように摩耗量は照射線量とともに増加した。これは荷重 70 g (接触力 196 g)、振幅 40μ での測定結果であるが、荷重を 150 g に上げてこの傾向は変わらない (この場合、被照射試料と未照射試料の間には、この図で示されたほど大

きな差異はなかった)。

前に述べたように、ナイロンは接触面で局所的に金属円筒に強く接着し、これによって母体がえぐり取られて摩耗が進行するものとすれば、架橋度が進むほど、このえぐり取られる量は増大するはずである。このようにして、放射線照射による耐摩耗性の低下も、この摩耗機構が成立する範囲内ではいちおう説明できる。

6. ポリ塩化ビニルの摩耗

これまでに採用した実験条件では、塩化ビニルの摩耗量ははなはだしく、精密な測定ができなかったので低い接触力と小振幅 (112 g , 25μ) で測定した。このプラスチックは可塑剤によって性質を著しく変えるるので、ここではその含有量が摩耗特性に及ぼす影響を調べた (塩化ビニルは分解形に属するので、放射線による強化に対してはあまり期待できない)。可塑剤 (ジ・オプチル・フタレート) の含有量が 0, 5, 10 および 20 % の場合の測定結果を第 17 図に示した。少量の含有量 (5 %) のときに多少よい耐摩耗性を示しているが、一般に可塑剤の増加とともに摩耗量も増加している。

7. 結 言

以上、微小振動を行なう金属円筒とプラスチックの間に起る摩耗現象を研究した。この装置は金属の摩耗試験の一種である *fretting corrosion* に相当するものであるが、超音波振動を利用することにより測定をきわめて迅速に行なうことができ、また摩耗量が実験中随時測定できる特長がある。実験は荷重が 50~200 g、振幅が $25\sim 75\mu$ の範囲で行なったのであるが、そのお

第 15 図 ナイロンの摩耗-時間特性 (振幅依存性)

第 16 図 γ 線照射の影響 (6-ナイロン)

第 17 図 ポリ塩化ビニルの摩耗特性

もな結果を要約すれば次のようである。

(1) ポリエチレンの摩耗-時間曲線の形は接触力にはあまり左右されないが、振幅に大きく依存する。振幅の増加とともに初期摩耗の領域が長くなり、摩耗量は摩擦距離に対して直線的に変化するようになる。ナイロンの摩耗-時間曲線は接触力によって複雑にその形状を変える。

(2) 6-ナイロンは接触力の大きいときはすぐれた耐摩耗性を現わすけれども、接触力が小さくなるに従ってきわめて悪くなり、ポリエチレンにも劣るようになる。ポリエチレンは、反対に、接触力の小さいときはよい耐摩耗特性を示すが、接触力の増加とともにしだいに摩耗特性が悪くなり、普通に予期されるような傾向を示す。

(3) ポリエチレンもナイロンも摩耗量は振幅の増加とともに放物線的に上昇する。

(4) 真空中で γ 線照射を受けたポリエチレンは耐摩耗性を著しく改善するけれども、空気中での照射はかえって悪影響を及ぼす。ナイロンへの γ 線照射はその耐摩耗性を低下させる。

(5) ポリ塩化ビニルの摩耗特性はきわめて悪く、可塑剤の充てんによってもその特性は改善されない。

文 献

- (1) K. V. Sooter, *Proc. Roy. Soc. Lond., Sec. A*, **212** (1952), 488.
- (2) 河本, 広恵外, 機械学会論文集, **18**, 71 (昭27), 42, 49.
- (3) 松原, 機械試験所所報, **5**, 8 (昭26), 345; **8**, 1 (昭29), 8; **10**, 3 (昭31), 115, 131.
- (4) 佐田, 水野, 科学研究所報告, **33**, 2 (昭32), 45.
- (5) 曾田, 青木, 機械学会論文集, **25**, 158 (昭34-10), 995.
- (6) W.P. Mason & R.F. Wick, *J. Acous. Soc. Amer.*, **23**, 2 (1951), 209.
- (7) 佐田, 機械学会論文集, **24**, 143 (昭33-7), 407.
- (8) J.S. Halliday & W. Hirst, *Proc. Roy. Soc. Lond., Sec. A*, **236** (1956), 411.

621-272. 2:539. 384. 1. 385

コイルばねの静的ならびに動的挙動*

(端 末 の 影 響)

清 水 浩**, 井上 順吉***, 日高 照晃***

On the Static and Dynamic Behavior of Coil Springs

(The End Effect)

by Hirorhi SHIMIZU, Junkichi INOUE,
and Teruaki HIDAKA

The end effect of a coil spring is analysed from the standpoint of perturbation as that on a three dimensionally curved slender beam which forms a coil spring with a constant pitch angle. The variation of the twisting moment or shearing stresses along the axis of wire becomes large in any numbers of turn near the both ends. The maximum shearing stresses are illustrated in terms of the number of turns of coil springs so as to be convinced to designing.

1. ま え が き

弁ばね, 噴射ポンププランジャ用ばね, ならびに車両ばねなど機械の要素に使用されている圧縮ばねは非常に多く, その需要はますます増加しつつある。一方これに伴ってその性能の向上が近時盛んに要求されるようになった。ばねに関しては, 素線の組成, 処理など材料に関する研究のほか, 強度, 疲れ, 内部摩

擦, 振動, 衝撃などの問題に関してもかなり以前から有益な研究が発表されている。

コイルばねは繰返し応力をうけ端末より一巻ないし二巻付近で折れやすい。これに関して動的あるいは静的考察がなされている。静的応力の解析に関する代表的研究としては次のようなものがある。A. Röver⁽¹⁾はコイル内面と外面では長さが異なるためにモーメントをうけるためのせん断応力は内面に大きいこと, さらに直接荷重からうけるせん断断力をこれに加算して, はじめにピッチ角を無視した式を導き, これに後からピッチ角を曲率だけに考慮して式を導いた。当然末端

* 昭和 33 年 11 月 6 日 学部臨時大会講演会において講演, 原稿受付 昭和 35 年 11 月 28 日。

** 正員, 九州大学工学部。

*** 正員, 九州工業大学(戸畑市中原)。