研 究

ポータブル摩耗試験機の試作研究

大 越 諄* 水 野 万 亀 雄*

A Newly Designed Portable Wear Testing Machine

Makoto OKOSHI and Makio MIZUNO

A newly designed portable wear testing machine is presented in this paper. The spherical rotating wheel of this machine is impressed on the flat surface of the test piece under the load which is increased in proportion to the increase of the contact area between the rotating wheel and the test piece, and therefore the mean contact pressure is constant notwithstanding the increase of the depth of the impression. The load is applied by means of an electro-magnet, and hence the more deeply the wheel is lowered into the wear track of the test piece, the less the gap of the electromagnet and so the heavier the load. It is investigated theoretically and experimentally that the pressure varies little during test. The wear amount is estimated by measuring diameter of the wear impression microscopically. Microwear volume can be detected by the machine within a short time. The machine is portable (about 6 kg) and can be fixed on a large test piece.

1. 緒 言

摩耗に関する研究は19世紀に発表され初めてから、今日まで連綿として続いているが、その本質は依然として十分に説明されていない。その原因は摩耗試験における諸条件のすべてが重要な因子であるために現象が複雑すぎ、また再現性にとぼしいこと、および摩耗の研究は人間をも摩耗させると云われるほど労力がかかりすぎることなどによつてゐる。他方研究に附随して摩耗試験機も種々考案されているが、そのなかの代表的な迂り摩耗試験機と、これから発表しようとするポータブル摩耗試験機の性能を列挙すれば表1のとおりである。

表1 迂り摩耗試験機の性能比較

形 式	施度及環	定圧	表面試験	材料の選定	試験採取の容易	測定感度	調整の容易
Amf式摩耗試験機 ^①	×	○	×	○	×	×	×
鈴木式摩耗試験機 ^②	○	○	×	○	×	×	×
本多式摩耗試験機 ^③	×	○	×	×	×	×	×
Sau.式摩耗試験機 ^④	×	×	○	×	×	○	×
三越式迂回摩耗試験機 ^⑤	○	○	○	○	×	○	×
機1摩耗試験機 ^⑥	×	×	○	×	×	○	○
ポータブル摩耗試験機	○	○	○	×	○	○	○

表中に明記したように各試験機はそれぞれ特徴を有

し、その優劣を簡単に論じ得ないが、これらの条件をすべて満足させることが可能ならば応用範囲も広く理想的と言えよう。

ポータブル摩耗試験機はこの目的に沿つて考案したものである。

2. 原 理

ポータブル摩耗試験機は球面をもつ回転子を使用することによつて、ごく表層の耐摩耗性を簡単に測定するもので、一定圧力のもとで試験条件を広範囲にかえて試験が行なえる。

その原理は図1に示すような球面をもつ回転子を下

図1 原理図

の試料に押付けながら回転させて摩耗試験をおこなう場合試験の初期は点接触ではじまり、摩耗が進行するに従

* 理化学研究所 正会員

つて次第に接触面積は増大する。回転子に静荷重を加えたのみでは接触圧力は試験時間の経過とともに刻々と減少する。しかしながら摩耗試験においては接触圧力は条件の主因となるものであり、定圧を保ち得ない場合は試験機の価値は半減される。図1において定圧にするには接触面積に比例するような荷重 P_0 を常に制御して加えていかなければならない。

図1の如き球面が平面と接触するとき、接触圧力 p_0 は幾何的に

$$p_0 = \frac{P_0}{2\pi r h_0} \quad (1)$$

ただし r ; 回転子の半径

h_0 ; 摩耗痕深さ

として表わすことができるから、接触圧力 p_0 を一定に保つためには、試験中の摩耗痕深さ h_0 に比例した試験荷重 P_0 を常に加えればよい。その方法として磁石の吸引力を利用すれば近似的に以上の関係を満足させることが可能である。

図2の如き電磁装置において、磁極間隙 h のときの吸引力 P は、

図2 電磁石装置

$$P = \frac{(iN)^2}{2} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{S_1 + S_2} \cdot \frac{\mu_0}{(h + l/\mu_s)^2} \quad (2)$$

ただし iN ; アンペアターン S_1 ; 内輪の面積

R_m ; 磁気抵抗 S_2 ; 外輪の面積

μ_s ; 軟鉄の透磁率 l ; 電磁石の有効長さ

μ_0 ; 真空中の透磁率

であるから $l/\mu_s \ll h$ なるときは磁極間隙 h の2乗に吸引力 P は逆比例するから、その関係は図3の如くなる。今磁極間隙 h を設け、これより更に h_0 だけ磁極に

図3 磁極間隙と吸引力の関係

接近させると、そのために P_0 の吸引力の増加が認められる。 Δh_0 が微小であるとき、図3の曲線の一部は直線とおき換え得るから、 P_0/h_0 を近似的に一定になし得る。またその大きさは初めの磁極間隙 h によって定まる。

3. 構造

ポータブル摩耗試験機の構造は図4のごとくである。すなわち球面の回転子2は本体1の中央を上下動する主

図4 ポータブル摩耗試験機の機構図

軸3の下部に取付けられ、試片8と接触しながら回転し、摩耗試験をおこなう。本体1は非磁性体で構成し、その上部に電磁石5を取付けてある。一方非磁性体の主軸3の上部に軟鉄の極板4をおき、電磁石との間に微小間隙 h を設けておく。この状態で摩耗試験をおこなうと、試験の進行とともに球面の回転子2は摩耗痕の深さ h_0 だけ下るから、主軸3および軟鉄極板4も同時に h_0 だけ下方に移動する。よつて初期間隙 h に対して h_0 だけ極間隙が接近したことになり、そのために吸引力 P_0 の増加が得られ、接触圧力を一定に保とうとするものである。

図4におけるスプリングはあらかじめ主軸3, 回転子2, 軟鉄極板4の自重, および電磁石の初期吸引力 P_0 を取除くために取付けたものである。

なお本体1の底部には, 電磁石7を設置してあるので, 試料が磁性体の場合は据付けが簡単となる。

以上のように簡単な原理・構造であるため, 試験機本体は 6kg の超小型に製作することができた。

4. 性能

ポータブル摩耗試験機の外観写真を図5に示し, その性能の概要を表2に示す。

図5 ポータブル摩耗試験機の外観

表2 ポータブル摩耗試験機の性能

摩擦速度	0.33 ~ 6.5 m/sec	(無段階変換)
接触圧力	0 ~ 45 kg/cm ²	(無段階変換)
測定感度	0.01 mg	(重量換算)
試験機容量	100×70×220 mm	6 kg
試験時間	5 ~ 20分	
所要馬力	1/2 H.P.	

ポータブル摩耗試験機には従来の型式に全く見られない球面回転子の考案によつて, 種々の利点が得られた。それを列記すれば次の事項があげられる。

- 1) 定圧機構がきわめて簡単。そのため接触圧力は無段階に変換し得たこと。

- 2) 片アタリ現象がない。

- 3) 微小摩耗量を測定できること。いいかえれば表面の耐摩耗性がわかり, かつ短時間で試験が完了することを意味する。

従来の試験法では試験前にアタリの調整をとることがまず第一の仕事であり, その良否は測定値を大きく左右した。また微量の摩耗量で判定するような場合は, ことに熟練を必要とした。たとえば薄い回転円板で試験を行なう際に, 回転軸と試片との平行が完全でないと片アタリのままで試験が進行し, 接触圧力・接触面積など異なるため, 本質的に良好な結果が得られるべくもない。

球面の場合には回転軸が傾斜していても片アタリを生ぜず, 調整に費やしていた無駄な労力が省ける。

また試料は試験片として特別な形状を要求しないから, 従来試料を製作していた労力も省ける。大きな平面に対しては試験機を直接試料上に設置することによつて, 直ちに試験がおこなえる。製品として加工された機械の送り面などの場合は, 現物より試片として採取することは事実上でき難く, 従来の型式のものでは試験が不可能であつたが, ポータブル摩耗試験機を使用することによつて簡単に試験を遂行することができ, また摩耗痕が小さいから機械は殆んど損傷を受けない。

4.1 接触圧力について

摩耗試験において, 試験条件の大きな因子として接触圧力の問題があげられる。処女面摩耗およびある特定の

材料, 特定の範囲内での接触圧力下においては, 摩耗の進行が接触圧力に比例することが知られているが⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾, 実際には摩耗変質層, 摩耗粉の存在などのために不規則な関係となることが多い¹¹⁾¹²⁾¹³⁾。それゆえ試験が実用に近い条件でできるならば, それ以上の最良の状態は

図6 電磁石特性

ないわけである。よつて試験機の設計にあつて, 接触圧力も可能な限り広範囲に, かつ無段階にとれることが

望ましい。ポータブル摩耗試験機では電磁石の間隙によつて得られる吸引力で圧力を加えるために、この方面から制約を受けたが 45kg/cm^2 までの接触圧力が無段階に得られた。

回転子に加わる荷重 P と磁極間隙 h との関係は、さきに述べた (2) 式の関係式が成立するが、(2) 式に $iN=330\text{Amp}\cdot\text{turn}$

$$\frac{S_1 \cdot S_2}{S_1 + S_2} = 0.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

として得た計算値は図 6 の破線で、実測の結果とはほぼ一致している。

磁極間隙を h にしたときの吸引力は (2) 式で与えられるが、試験に際しては図 4 ⑥のスプリングによつて平衡をとり初期荷重 P_1 のみ加わるようにしておく。すなわち平衡のために荷重として

$$P' = -\frac{(iN)^2}{2} \frac{S_1 \cdot S_2}{S_1 + S_2} \frac{\mu_0}{(h+l/\mu_s)^2} + P_1$$

を加える。試験完了のときは摩耗痕深さが h_0 になっているから、磁極間隙は $h-h_0$ であり、したがつて吸引力 P_0 の増加としては

$$P_0 = \frac{(iN)^2}{2} \frac{S_1 \cdot S_2}{S_1 + S_2} \cdot \mu_0 \cdot \left\{ \frac{1}{(h+l/\mu_s-h_0)^2} - \frac{1}{(h+l/\mu_s)^2} \right\} + P_1 \quad (3)$$

である。ところで

$$H = h_0 / (h+l/\mu_s) \approx h_0 / h$$

$$K = \frac{(iN)^2}{2} \frac{S_1 \cdot S_2}{S_1 + S_2} \cdot \mu_0$$

とおきかえ、(1) 式に代入して接触圧力 p_0 を求めると、

$$p_0 = \frac{K}{2\pi r} \frac{2-H}{h^3(1-H)^2} + \frac{P_1}{2\pi r h_0}$$

初期荷重 P_1 がなく、また理想的に深さ h_0 に比例し

図 7 接触圧力の変化

て荷重を加えたとしたときの圧力を p^* とすると、その比は

$$\frac{p_0}{p^*} = \frac{2-H}{2(1-H)^2} + \frac{P_1}{2K} \cdot \frac{h^2}{H} \quad (4)$$

であらわされる。実測値として $K=1.82\text{kg}\cdot\text{mm}^2$, $P=0.1\text{kg}$ をとると、その関係は図 7 のごとくで、(4) 式の第一項は電磁石による吸引力の圧力変化を、第二項は初期荷重による圧力変化をあらわしている。第一項は H の増加によつて大きくなるが、第二項は試験の初期において著しく大きな値を示すが、試験の進行とともに急激に減少して小さな値となる。ゆえに圧力変化として図 7 のような曲線を描くが、これはまた磁極間隙 h の値によつて左右される。

たとえば $H=0.06$ の位置で試験を終了したとすれば、試験初期の接触圧力の変動の大きい期間は全期間の 5% 以内であり、一応これを除いて考えれば、図 7 の $H=0.06$ における接触圧力比と、最小値との差が試験中の圧力変化となる。

摩耗試験の接触圧力として、おおよそ $2 \sim 45\text{kg/cm}^2$ でまにあうが、これは図 8

図 8 接触圧力の調整

より求められるように、磁極間隙では $1.0 \sim 0.3\text{mm}$ の範囲に相当する。たとえば $H=0.06$ の位置で試験を終了したとすると、圧力変化は $h=1.0\text{mm}$ で 6.2% , $h=0.3\text{mm}$ で 8.7% であり、近似的に定圧が保たれていることがわかる。このときの最終摩耗痕径はそれぞれ 3.5mm および 2.2mm 程度になるから、圧力変化を小にするには摩耗痕径をあまり大きくせず 3mm 以内に止めるべきである。

このようにして得た接触圧力は磁極間隙 h を表わす外周目盛によつて指示されるが、その関係は図 8 に示すとおりである。

4.2 摩耗量の測定

従来の摩耗試験法においては、しばしば化学天秤を併用して、摩耗減量をもって摩耗量とする場合がある。その方法では摩耗量は化学天秤の感度によって左右されるから、試験誤差を考慮に入れると相当に摩耗をさせることが必要となり、必然的に試験時間が長びかざるを得ない。また摩耗量が多量に微量でありすぎると検出が不可能となることもある。

ポータブル摩耗試験機においては、図1の幾何図形より痕径を測定することによって、化学天秤を使用せずして摩耗量を求め得る。摩耗量は摩耗痕深さ h_0 で表示する方法が一番妥当と考えられるから、

$$h_0 = r - \sqrt{r^2 - d^2/4}$$

$$\approx \frac{d^2}{8r} \quad (5)$$

$$= 5d^2 \times 10^{-3} \text{ mm} \quad (5')$$

そのときの摩耗容積 w は

$$w \approx \frac{\pi d^4}{64r} \quad (6)$$

$$= 1.96d^4 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 \quad (6')$$

として求められる。使用せる回転子は半径 25mm の球面であるから、摩耗痕深さ h_0 および摩耗容積 w はそれぞれ (5') 式および (6') 式で与えられ、痕径 d の測定によって幾何的に感度が増幅されたことに相当する。

(5'), (6') 式より具体的な一例を表3にかかげた。痕径が 1~3 mm のものを、摩耗減量に換算するとわず

表3 測定感度

$d = 1.0 \text{ mm}$	$d = 3.0 \text{ mm}$
$w = 1.96 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$	$w = 158.6 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$
$W = 0.015 \text{ mg}$	$W = 2.380 \text{ mg}$
$h = 0.005 \text{ mm}$	$h = 0.045 \text{ mm}$

[備考] $\rho = 7.8$

か 0.01~2.38mg であり、感度は 0.001mg 程度の微量まで求めることができる。また摩耗痕の深さも非常に小さいから、材料の表層の耐摩耗性を調べ得る利点をもっている。

以上述べたように微量の摩耗量で試験が完了し得るから、それだけ試験時間の短縮が可能であり、従来の型式に比較すると $1/100 \sim 1/1000$ の試験時間で充分である。実際には 5~20 分で試験は終了する。

4.3 速度変換について

回転伝達方式として種々の方法が考えられるが、こ

ではポータブルな特徴を生かす意味で一番簡便なフレキシブル・シャフトを使用し、摩擦速度を無段階に得られるように $1/2 \text{ H.P.}$ の超分巻整流子電動機 (125~2500 r.p.m.) で駆動した。そのため摩耗試験機を任意の希望する場所に簡単に設置し、かつ動力が楽に得られるので、迅速に試験を行うことができ、一応の目的を達成することができた。

しかしながら、反面にフレキシブル・シャフトによる伝達方式の悪い影響も現われた。それは振動と回転むらの問題であるが、この点だけから論ずるならば、油圧方式あるいは圧縮機械による伝達法が優れている。だがそれらの方式においては、低回転においても試験に充分なトルクを小型装置で常時出すことは至難であり、相当程度試験機の性能をさげても伝導装置が大きくなり、設計上に無理を生ずるなど、これらの伝導方式を比較すると何れも一長一短を有すると言えよう。

振動の問題は、試験機の回転子、軸受などの加工精度、および動力の伝達方式によって機械の振動特性が異なることは申すまでもない。まづ動力を介入させずに静的

図9 振動特性 (静特性)

に回転させ、これと動特性を比較検討してみよう。

さきに述べたごとく、試験機にはその上部に電磁石を設置し、間隙 h を利用して試験荷重を加えるため、間隙 h の変動は直接に接触圧力の変化を意味し、かつ試料に

図10 回転数と振幅の関係

衝撃をも与えるので望ましい事ではない。それには主軸上における縦振動を取扱えばよい。

主軸上における静的特性を測定して見ると、図 9 に示すごとく最大振幅はきわめて小さく、わずか 0.2μ であった。これは、回転子、軸受などの加工精度が優秀であることを示している。よつて動特性による振動は、すべてフレキシブル・シャフトによる回転伝導の影響であると断言しても差支えなからう。

フレキシブル・シャフトはその寸法、回転数、伝達ト

れも増加しており、主軸は試験機本体の中を上下動できるように振幅も大きく、本体上の約 2 倍の値を示した。

摩擦速度が 2.0m/sec (760r.p.m.) においては、主軸上にて 3.9μ 、試験機本体上で、 1.5μ の振幅を示したが、この程度であれば試験結果に影響を及ぼす恐れはないと考えられる。

回転むらの測定は荷重 5kg で摩擦速度を $0.5, 0.75, 1.0, 1.25\text{m/sec}$ とし、そのときの角変位をストロボ装置にて撮影し、速度むらを算出した。図 11 の瞬間写真

回転数 196r.p.m.
摩擦速度 0.5m/sec
無負荷
 $T=1/50$ シャッター $1/2$

回転数 196r.p.m.
摩擦速度 0.5m/sec
荷重 5kg
 $T=1/50$ シャッター $1/4$

図 11 ストロボ装置による瞬間写真

ルク、曲げの状態によつて振動特性が異なることは論ずるまでもない。いまシャフト径 $9\text{mm}\phi$ 、管内径 $12\text{mm}\phi$ 、長さ 1m のものを使用し、接触圧力が 15kg/cm^2 で試験した結果は図 10 で、最大振幅は回転数に比例して何

図 12 移動車の外観

はその一例で、摩擦速度 0.5m/sec 、荷重 5kg の場合の回転むらの状態を撮したもので 1 間隔は $1/50$ 秒である。このような瞬間写真から速度むらを求めてみると、 1.25m/sec 以上の高速では瞬間速度が平均速度の $1/2 \sim 2$ 倍に変動するので更に一考を要しよう。

4.4 摩擦試験機の附属装置

この試験機の特性を充分に発揮させるには、何処へでも移動が可能でなければなら

図 13 配線図

ぬ。試験機本体は超小型であるが、電動機、整流装置、制御装置は比較的大きいので、これらを図 12 の移動車に組入れた。その上面には制御用の押釦、切換スイッチ、計数器を配置し、操作を簡略化した。制御装置の配線は図 13 のごとくで、次の各部によつて構成されている。

1) 電動機の駆動

入力 AC 200 Volt とし、電磁開閉器を経て電動機に配線されている。途中押釦および計数器を挿入し、希望の回転数で自動的に電動機が停止するよう配慮した。すなわち電動機の回転に計数器を同調させておけば、試験中は図のごとく B—C が接続されているが、希望の回転数に達すると計数器が働いて B—C は断続となり、電磁開閉器は切れ、電動機は停止する。しかし押釦によつて、いつでも計数器に関係なく、起動、停止させることができる。

2) 整流装置

図 13 右上の配線は入力 AC 200 Volt を変圧して 20, 40, 60 Volt の直流を得て、電磁石用に利用するもので、両波整流センタ・タップ回路を採用して電流を平滑化し、更に内部抵抗値が一定となるよう注意した。電圧の増加にしたがつて電流値も比例的に増加するから、電磁石の吸引力は (2) 式にならつて $(iN)^2$ で大幅に変化する。

上述の変圧器の一部から別に整流し、これを試験機本体の底部に設けた試験機固定用の電磁石に利用した。その配線は図 13 右中央に示した。

その他 A, B はパイロット・ランプで、作動の確認、及び故障の発見に役立つ。

5. 結 論

以上述べて来たことを要約すると、

1) 球面を有する回転子を使用することによつて、次の長所を得ることができた。

1.1) 定圧機構が簡単におこなえ、かつ圧力を無段階に調節することができた。

1.2) 片アタリ現象が全く無くなつたこと。

1.3) 微小摩耗量を測定できること。

2) ポータブル摩耗試験機の構造は簡単のため、約 6 kg と云う超小型に製作できた。

3) 試料より試験片としての採取が不必要となつた。

4) 試験時間が非常に短縮され、5～20分程度で試験は完了する。

5) 摩擦速度は 0.33～6.5m/sec の広範囲に、無段階に変換することができた。

6) フレキシブル・シャフトは回転むらの発生原因であるので、現在別の駆動方式を考慮している。

終りに、本研究は昭和33年度通産省応用研究補助金にておこなつたもので、助言を戴いた当研究室の佐田登志夫氏と、実験に協力した当研究室の熊谷信二君に感謝する。

(1959, 12月8日受付)

参 考 文 献

- 1) V.D.I., Bd. 66 (1922) p.377. : 東京衡機製造所カタログ.
- 2) 鈴木益広 : 機械学会誌, Vol.29 (1926) p.273 : 島津製作所カタログ.
- 3) 本多光太郎 : 金属の研究, Vol.1 (1924) p.38.
- 4) 機械学会誌, Vol.40, p.532 : Vol.41, p.29, 英国特許, 423764.
- 5) 大越諄, 佐田登志夫, 水野万亀雄 : 科研報告, Vol.31, p.103.
- 6) P.Grodzinski : Research, Vol.6, p.98.
- 7) 大越諄, 水野万亀雄 : 精機学会25周年記念講演会前刷.
- 8) E. Rabinowicz : Proc. Phys. Soc., B Vol. 66 (1953) p.929.
- 9) J. F. Archard : J. of Appl. Phys. Vol. 24 (1953) p.981.
- 10) 伊藤祐光, 石山菊三 : 機械試験所報, Vol. 13 (1959) p.18.
- 11) 大越諄, 坂井秀春 : 機械学会論文集, Vol.7 (昭和16年) p. 1—29.
- 12) W.Hirst, J.K.Lancaster : J. of Appl. Phys. Vol.27 (1956) p.1057.
- 13) 小川喜代一 : 金属学会誌, Vol. 16 (昭和27年) p.382.