 研 究

しまりばめの研究 (第3報)

— あらさの影響 —

岩 城 晃* 森 昌 幹**

Study on Fit of the Machine Parts (3rd Report)

Akira IWAKI, Masaki MORI

In this report are studied the influences of surface roughness on the contacting pressure, tightness of fits and ratio of contact.

Transfiguration of the surfaces under the repeating fits is analysed by introducing the idea of real ratio of contact which has been reported by Bowden and Holm, into the distribution of surface roughness, and thus the actual fitting pressure, which is as a rule, different from the theoretical value, becomes possible to be estimated. As the number of repeating fits increases and the tightness becomes lower, the peaks of the surface profiles are flattened, and the bearing surface draws near to the position a little apart from the center surface of the initial irregular profiles of the surface.

Hence the final tightness after repeating fits can be estimated if the initial diameters and the figures of surface irregularities are known.

1. 緒 言

しまりばめの固着力が設計値といちじるしく相異なる原因として、本報でははめあい面のあらさがはめあい圧力や固着力などにおよぼす影響を考察する。

はめあい面にあらさがある場合は、圧入の際あらさの山がつぶれ、あるいは摩耗してしめしろが変化するが、これについては G. Schmaltz¹⁾ が一つの見解を述べている。

ここでは、このあらさの変化過程を、接触面の真実接触率から導く方法を考え、実験と比較する。

2. 圧入に伴うあらさ分布の変化の理論化

粗面に平滑な硬い物体を押しつける時、あらさの山の先端では接触圧力が高いために塑性変形の領域に入っている。

Bowden²⁾, Holm³⁾ 等の研究によれば、真実接触部の圧力は軟らかい方の材質のブリネルかたさ H_B の値とほぼ同程度にあるといわれる。これを用いれば真実接触率 α は次のように書かれる。

$$\alpha = \frac{\text{真実接触面積 } a}{\text{見かけの接触面積 } A} = \frac{\text{見かけの圧力 } p}{\text{ブリネルかたさ } H_B} \quad (1)$$

あらさの山の先端は圧入によつてつぶれ、あるいは摩耗して、ある高さに落着くが、その時の局部圧力はブリネルかたさ程度にあるものとみられるから、式(1)を利用すれば、その落着く位置を計算することができる。

以下、つぶれとは形は変化するが容積は変わらない場合を、また摩耗とはあらさの山が剪断されて脱落する場合を意味するものとする。

図 1 真実接触率

いま図1のようにあらさ分布の密度関数をその平均値を原点にして $f_0(x)$ で表わす。1回目の接触によつてあらさの凸端 x_0 が Δx_1 だけ沈み端点が x_1 になったとすれば、ハッチングの面積、すなわち確率は接触率にあたるから

$$\alpha_1 = \int_{x_0}^{x_0 + \Delta x_1} f_0(x) dx \quad (2)$$

* 九州工業大学 正会員

** 群馬大学工学部 正会員

またこのような接触が n 回行なわれたとしたとき、それ迄に接触した面積のみかけの面積に対する比、すなわちあたり率 β_n は次のようにかかれる。

$$\beta_n = \int_{x_0}^{x_0 + \sum \Delta x_i} f_0(x) dx \quad (3)$$

ただし Δx_i は第 i 回目の沈み量で、 $\sum$ は $i=1$ から n までについて行なう。

ここであらさ分布を正規型とみなし、あらさの凸端がまもうする場合とつぶれる場合の二種の変化を仮定し数値計算を行なう。

(i) あらさの凸端がまもうする場合

あらさ分布の標準偏差を $D(R)=\sigma$ 、またあらさの凸端を 2σ とすればその分布曲線は

$$f_0(x) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}}{\left\{1 - \int_{-\infty}^{-2\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx\right\}}$$

ここで $x/\sigma=t$ において標準化すれば、 $x_0/\sigma=t_0=-2$ で

$$f_0(t) = \phi(t)/\{1-\Phi(t_0)\} \quad (4)$$

また Δx_1 だけ沈んだ時の接触率は、 $\Delta x_1/\sigma=\Delta t_1$ とし

$$\alpha_1 = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_1} \frac{\phi(t)}{1-\Phi(t_0)} dt \quad (5)$$

あらさのまもう量を計算するには、まず式(1)、および第1報式(9)から接触率 α_1 を求め、(5)から標準化されたまもう量 Δt_1 を得、それによつてまもう量 $\Delta x_1 = \sigma \cdot \Delta t_1$ が求められる。

次にこのように変化した後のあらさ分布の密度関数を $f_1(t)$ とすれば、 $f_1(t)$ は次のように書かれる。

$$f_1(t) = \phi(t)/\{1-\Phi(t_1)\} \quad (6)$$

この時あらさの凸端の座標は $t_1 = -2 + \Delta x_1/\sigma = -2 + \Delta t_1$ 、すなわち $x_1 = -2\sigma + \Delta x_1$ となつていたので、さらに圧入を行なつた2回目の接触率 α_2 は、標準化まもう量を Δt_2 として次のようにかかれる。

$$\alpha_2 = \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t_2} \frac{\phi(t)}{1-\Phi(t_1)} dt \quad (7)$$

この $\Delta t_2 = \Delta x_2/\sigma$ を求めるには、2回目は既にリング内径が $2\Delta t_1 \cdot \sigma$ だけ大きくなつていから、はじめのしめしろ δ_1 が $\delta_1 - 2\Delta t_1 \cdot \sigma$ に減じたことに留意して、式(1)および第1報の式(9)から α_2 を定め、式(7)より Δt_2 を求めればよい。

以下同様にして n 回後のあらさ分布の密度関数 $f_n(t)$ は

$$f_n(t) = \phi(t)/\{1-\Phi(t_n)\} \quad (8)$$

$$\text{ただし、} t_n = t_{n-1} + \Delta t_n = t_0 + \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \quad \Delta t_i = \Delta x_i/\sigma$$

ここに回数とは次の事を意味する。

実際のはめあい過程には摺動が含まれるが、特に摺動を除いた場合のはめあいを仮想し、そのはめあいの回数をいう。以下実際のはめあい回数との区別をつけるために前者を押抜き回数、後者を順位とよぶことにする。

(ii) あらさの凸端がつぶれる場合

図2 あらさ分布の変化

あらさの凸端がつぶれる場合は実質部の体積は不変であるから、平均値は変わらないと考えられる。図2(ii)において $f_0(x)$ の平均値 m_0 を求めると

$$m_0 = \int_{x_0}^{+\infty} x f_0(x) dx = \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{e^{-\frac{x_0^2}{2\sigma^2}}}{1-\Phi(x_0)} = \frac{\sigma \phi(t_0)}{1-\Phi(t_0)} \quad (9)$$

1回接触後の平均値 m_1 は

$$m_1 = \sigma \cdot \phi(t_1)/\{1-\Phi(t_1)\} \quad (10)$$

ただし、 $t_1 = t_0 + \Delta t_1$

あらさ分布の平均値は計算上 $m_1 - m_0 = \Delta m_1$ だけずれているが、実際は平均値は変わらないから、このずれを元に戻してやれば、1回接触後のしめしろ δ_2 は次のようになる。

$$\delta_2 = \delta_1 - 2\sigma \cdot \Delta t_1 + 2\Delta m_1$$

以下同様にして、 n 回目の接触を行なう時のしめしろ δ_n は次のようになる。

$$\delta_n = \delta_{n-1} - 2\sigma \cdot \Delta t_{n-1} + 2\Delta m_{n-1}$$

ただし、 $\Delta m_{n-1} = m_{n-1} - m_{n-2}$

この場合の変化は(ii)のようになる。

これらの各場合について、あらさ $H_{\max}=10, 20, 30 \mu$ しめしろ $\delta=10, 20, 40 \mu$ として、しめしろ、はめあい圧力、あたり率の変化を順位15回まで計算すると、図3のようになる。

図において、しめしろおよびはめあい圧力は、接触回数、すなわち順位が増すにつれて最初急激に低下し、後

図 3 しめしろ, はめあい圧力, あたり率の理論値

次第にゆるやかになつて落着く傾向にある。そして同一しめしろについては, あらさが大きいほど低下がいちじるしく, また同一あらさとしめしろについては, 摩耗する方がつぶれる場合よりもいichじるしい。

また (b) において, あたり率は順位が増すにつれて最初急激に増加し, 後次第にゆるやかになり落着く傾向にある。そして同一しめしろではあらさが小さいほど増加がいichじるしく, また同一しめしろとあらさについては, つぶれる方が摩耗する方よりも増加がいichじるしい。

3. 実験方法

実験はあらさに比べて真円度や円筒度が無視できるよ

表 1 試料の機械的性質および工作精度
試料の機械的性質

試 料	炭 素 量	熱処理法	縦弾性係数 E kg/mm ²	ブリネル か た さ H_B
シャフト	0.6%	焼入れ	2.11×10^4	420
リング	0.4%	焼 準	2.12×10^4	173

試料の工作精度

試 料	あらさ H_{max} μ	仕上げ法
シャフト	0.5	研 削
リング	10~30	旋 削

リング内面あらさ $H_{max}(\mu)$		平均しめしろ $\delta(\mu)$	
称 呼	実 際	称 呼	実 際
10	8~12	10	9~11
20	16~24	20	19~21
30	24~36	40	39~41

うなシャフトとリングをはめ合わせ, あらさがはめあい圧力や固着力などにおよぼす影響を調べることである。

3.1. 試 料

試料の寸法形状は図 4 の通りである。特にあらさの影響のみをとり出すために, あらさに対して真円度や円筒度が無視できるようにした。材質,

図 4 試料の寸法形状

工作精度は表 1 の通りである。

3.2. 内, 外径の測定

リング内径の測定には第 1 報のシリンダゲージを用い円周方向 5 箇所, 軸方向 4 箇所, 計 20 箇所の平均値を μ まで求めた。一般にあらさのある時の測定値は, 材質, 測定圧, 測定端子半径などの影響をうけるのでこれを補正しあらさの凸端における内径を求めた⁴⁾。シャフト直径はミニメータにより同様に測定した。

3.3. 円周ひずみの測定

シャフトを完全にリングに押込んだ時, リング外周ひずみを抵抗線ひずみ計によつて測定した。

3.4. あらさ及びあたり

あらさメータによりリング入口, 中央, 出口の三個所を測つて平均し H_{max} を求めた。あたり率は最終押ししのすんだリングの 12 箇所のあらさを測定し, あらさの山のつぶれた長さの全長に対する比をとつた。

3.5. 圧入及び押出し

アムスラ式材料試験機により速度 40 mm/min にて押抜いた。潤滑剤にはスピンドル油 (ウイン添加) を用いた。

4. 実験結果

4.1. はめあい圧力

図 5 はしめしろ $\delta = 20 \mu$, あらさ $H_{max} = 10, 20 \mu$ の試料について繰返し押抜きを行なつた場合のはめあい圧力と押抜き回数の関係を円周ひずみから第 1 報式 (8) によつて計算しプロットしたものである。

また実線の曲線は 2 の (i) 摩耗する場合と (ii) つぶれる場合の圧力の平均値を, 押抜き 1 回を 1 順位として描いたものである。

実験値は理論値に比べて初めは急激に低下するが, 押抜き回数と共に次第に理論曲線に近づいてくる傾向がみられる。

図5 はめあい圧力の変化

図9 断面の状況

図6 固着力

図7 摩擦係数

図8 あらさ曲線の変化

4.2. 固着力

図6は前図の実験における最大圧入荷重の変化を示す。固着力もはめあい圧力同様初め急激に低下するが後次第に落着く。しかし同程度のしめしろ、あらさを持つ試料でも固着力にはかなりの差がみられる。

4.3. まさつ係数

図7は図5, 6から求められたまさつ係数を示す。まさつ係数は一つの試料でははめあい中ほとんど変化しないが、しかし同程度のしめしろ、あらさを持つ試料を相互に比較すると、その値はかなり異なる。

4.4. あたり

図8のあらさ曲線は $\delta=20\mu$, $H_{\max}=10\mu$ の試料を用いて繰返し押抜いた時、回数と共に表面曲線が変化の様子を示す。

あらさの凸端は回数と共に次第に平坦化するが、10回程度をこえたとほとんど変化せず、谷は依然として残されていることがわかる。

図9ははめあい中の試料を軸に直角に切断したものであたりは非常に小さく、大部分が隙いていることがわかる。

5. 考 察

図5において、しめしろ、あらさが同程度の試料でもはめあい圧力の大きさや下がり方がかなり異なるのは、シャフトによるあたりのむらや、あらさの形状にもとづくものと考えられる。

図中の実線の曲線は1順位を押抜き1回とおいた場合の計算値で、これが実験値と符合しないのは、摺動過程を含んだ1回と含まない1順位とを対等においたことなどによるものと思われる。そこで押抜き1回が何順位に相当するかを調べるに、1回目の押抜き後の圧力はおおよそ順位3に相当しているから、このように初回に対応し

た順位をもつて実際の押抜き回数と等価にみなすと、押抜き回数 1, 2, 3, ……がそれぞれ順位 3, 6, 9, ……に対応することになる。そこで、3 順位毎の値によつて整理し破線の曲線のようにかきかえると、実験値は両曲線の間におよそ含まれることが分かる。

この事は、理論ではたとえば予めリングを何らかの方法で掘げ、シャフトを挿入した後に外力を取り去つてしめつけを行なうような場合を想定しているが、実際は摺動を伴つて挿入されるのだから、1 回の押抜きでも、理論のようなあらさ変化が 2, 3 順位近くも起こっていることを意味するものと思われる。

設計上の目的から、初めのしめしろが固着力が安定するまでにどの位緩むかを知ることが大切である。

いま固着力がほとんど安定した時の目安として、順位 15 に対するしめしろ δ_{15} を選び、初めのしめしろ δ_1 との比 ξ をあらさの山が摩耗する場合について計算すれば図10のようになる。

図 10 しめしろ有効率

ξ は初めのしめしろ δ_1 が δ_{15} に減ずる割合であるから、これをしめしろ有効率と呼ぶことにする。図のように、 ξ は同一しめしろに対しては、あらさが大きいほど小さく、また同一あらさに対してはしめしろが小さいほど小さい。

このように、あらさが大きいほど ξ が低下するのは、あらさが大きいほど負荷面が深くなるためと考えられ、またしめしろが小さいほど ξ が低下するのは、しめしろに対するあらさの割合がいちじるしく関係するからと考えられる。

参考までに Schmaltz の地ならし寸法⁵⁾を用いて形状係数 $K=0.5$ として ξ を計算すると、破線のようになり、順位による値よりも小さい。

たとえば $\delta=10 \mu$, $H_{\max}=10 \mu$ の場合、Schmaltz

の方法では締付け力が無くなるが、順位を用いた場合では、まだいくらかの締付け力が残っていることになる。

図6の固着力をみると、しめしろあらさが同程度の試料でも固着力にかなりの差がみられるのは、あたりの相異によつてまさつの係数が変動するからと考えられる。

図7の摩擦係数をみると、一組の試料では繰返し回数に無関係にはほぼ一定であるが、異なる試料間でかなりの差がみられるのは、あたりの相異によつて潤滑状況が一樣にならないからと考えられる。なお摩擦係数はあらさにもしめしろにもほとんど無関係である。

図8のあらさの変化をみると、押抜き回数と共にあたりは漸次よくなるが次第に一定値に落ち着き、表面が容易に平滑にならないのは、負荷面がすでに十分耐圧性を持つていることと、あらさの谷の部分が潤滑油のたまり場として有効に働いているためと考えられる。

この時、表面が安定する位置は、はじめのあらさの平均線よりもやや高い所にあり、Schmaltz のように平滑には容易にならないから、設計にはこのことを考慮に含める必要があるものと考えられる。

図9の断面写真をみると、あらさのために隙間は意外に大きくなっている。この隙間はあらさの谷を切断したところと思われ、この隙間の奥には次の山らしきものが見られる、またまもう粉がはさまっているのが見られるが、これよりあらさのある場合のまもうはかなり激しいことがいえる。

6. 結 言

はめあい面にあらさがある時、あらさがはめあいの機能に及ぼす影響をしらべた結果次の事が明らかとなった。

(1) 圧入によつて、はめあい面のあらさがつぶれ、あるいは摩耗してしめしろやはめあい圧力が変化するのでこれを計算する方法を真実接触率を用いて導いた。

(2) (1)の計算値と実際の値とを比較したところ、実際の押抜き1回が順位の1～3順位に相当していることがわかつた。

(3) 固着力は繰返し押抜き回数とともに初め急激に低下するが、後次第に安定する。そして、しめしろ、あらさが同程度の試料でも、固着力にはかなりの差がみられる。

(4) 摩擦係数は同一試料については押抜き回数にかかわらずほとんど変化しないが、異なる試料の間ではかなりの差がみられる。

(5) しめしろ有効率は、しめしろが小さいほど、またあらさが大きいほど小さい。そして通常の部品では、50～80%程度とみられる。

(6) 繰返し押抜きを行なえば、あらさの山は次第に平坦化され、あたり率は次第に増加するが、10回程度を超えたとほとんど安定する。この安定位置は初めのあらさの平均線よりはやや高いところにあり、平均線には容易に達しない。そしてあらさの谷は容易に消失しない。

(7) はめあい面のあたりは予想外に小さく、当たっている部分では摩耗や焼付きが起こり易いから、潤滑には十分注意をしなければならない。

おわりに、本研究について卒業論文としてぼう大な数値計算を手伝われた学生赤丸、大石、碓、山県の諸君に感謝する。
(1961, 10月20日受付)

参考文献

- 1) G. Schmaltz : Oberflächenbeschaffenheit und Passungen (II. Mitteilung : Preßsitz), Werkstattstech. und Werksleiter, 1, Nov. (1936).
- 2) F.P. Bowden and D. Tabor : Proc. roy. Soc. Lond (1939). Sec. A.
- 3) R. Holm: Wisc. Veröff. Siemens-Konz. (1929)
- 4) 岩城, 森: 精密機械, 27巻1号 (1961) 1.
- 5) (1)に同じ。
- 6) 坪井, 伊佐: はめあい方式, 機械学会誌, 61巻470号 (1958).

第1報正誤表本誌45頁にあります。

錐形工具による低速小切込み切削 (第1報)

—— 切削抵抗の実験的検討 ——

田 中 行 雄** 人 見 宗 男**

Low Speed-Small Depth Cutting with Pyramidal Tool (1st Report)

—— Experimental Investigation of Cutting Resistance ——

Yukio TANAKA, Muneko HITOMI

In order to understand single grain cutting theoretically and make clear the grinding mechanism based on the cutting of the individual grain it is necessary to investigate the basic three-dimensional cutting of various pyramidal tools similar to the abrasive grain in shape.

In this paper, the cutting resistance in low speed-small depth cutting was measured with pyramidal tools of seven different shapes, and the following points were investigated :

- 1) Statistic distribution of the cutting resistance.
- 2) Relation between the cutting resistance and profile of cutting section.
- 3) Relation between the cutting resistance and the shape of the contact area.
- 4) Frictional resistance and plastic flow pressure.

1. 結 言

研削作用は、多数の砥粒切れ刃の高速微小切込みの、三次元切削が集成したものである。そこで、個々の切れ刃の切削作用を理論的に把握することにより、研削作用を説明する目的から、単一砥粒や模型砥粒による切削が盛んに研究されている。

しかし、一定の幾何学的形状をもたない砥粒切れ刃の切削を理論的に把握するには、研削時の砥粒切れ刃を幾

何学的に表わした模型砥粒による、高速微小切込みの三次元切削が明確にされねばならない。そこで、実験的あるいは理論的考察の簡単な、低速小切込みの三次元切削を把握し、それに速度効果と寸法効果を考慮することにより、高速微小切込みの三次元切削を理解しようという考えから、模型砥粒の低速小切込み切削を研究することにした。

さて、竹中²⁾、佐藤³⁾、小林⁴⁾等の、砥粒切れ刃の二次元的観測は、切れ刃を円錐(頂角 110°~160°, 先端曲率 $5\mu\sim 20\mu$) で近似できることを示しているが、著者らが、4—6 黄銅を使用状態の砥石で引つき、砥粒切れ刃の接触面を、顕微鏡観察した結果(これについては、

* 昭和34年11月精機学会関西支部秋季講演会、昭和35年2月関西砥粒加工研究会にて講演

** 関西大学工学部 正会員