(昭和 42 年 3 月 29 日 受理)

潤滑繊維の摩擦挙動に及ぼす油剤付着量の影響

(1) 滑り速度を変えた場合の油剤付着量の影響

東京工業大学 久世 栄一・古島 昭雄

EFFECTS OF THE AMOUNT OF LUBRICANT ON FRICTIONAL BEHAVIOUR OF FIBRE. (I) EFFECTS OF AMOUNT OF LUBRICANT ON THE FRICTION AT VARIOUS SLIDING SPEEDS.

By Eiichi Kuze and Teruo Furushima

(Tokyo Institute of Technology, Ōokayama, Meguro-ku, Tokyo, Japan)

The friction of fibres with the different amount of lubricant has been studied.

(1) When a liquid lubricant is applied the effects of the increased amount of lubricant on the friction of fibre can be classified into the following three types :

1) simple increase 2) the increased and then decreased 3) simple decrease

(2) When the amount of the lubricant decreases, the friction changes from constant to increased value at a specific amount of lubricant. This amount is large in higher sliding speed. This phenomena can be explained qualitatively by the theory of hydrodynamic lubrication of fibres.

(3) When liquid lubricant is applied the decreased friction due to the decreased amount of lubricant is accountable by slip of lubricant.

(Received March 29, 1967)

1. 緒 言

潤滑繊維の摩擦に対して油剤付着量がどのように影響するかについては実用上の要請もあつて多くの実験例が報告されている。乾燥摩擦よりだんだんと油剤付着量を増加させて行くとき、多くの場合微量の油剤付着で急激な摩擦低下がある。さらに付着量を増すと摩擦の低下が続いて起こるような場合^{1,2,3,4)}、摩擦が増加するような場合^{1,2,4,5,6,7)}、一度増加して後低下するような場合⁸⁾と3分類されるようである。そして付着量の増加を続けるとこれらはおおむね一定値に飽和するようである。また付着油剤の種類を変えた場合、すなわち分子鎖長の長さを変えた場合、鎖長の長いほど少量の油剤付着量で摩擦の最低値を得ることがわかつている^{2,4)}。

一方著者らは先に、繊維が流体潤滑下にあるという条件で油剤付着量がどのように摩擦に影響を及ぼすかの理論式を導いた⁹⁾。すなわち繊維または糸の単位長さあたりの摩擦力 f_l について次式を導いた。

$$f_l = kg(\mu U)^{1-N}$$

ここで μ は油剤粘度

U は摩擦物体の滑り速度

k は定数

N は定数 (摩擦指数)

g は $\eta/(\mu U)^N$ の関数である。

ただし η は付着油剤の厚さ。

直観的に考えて流体潤滑の場合は油剤付着量の増加に対して摩擦は減少し、ある付着量以上においてはほぼ一定値に達するものとみられる。そうならば上式において油剤粘度 μ または摩擦物体の滑り速度 U を変えると、この摩擦が一定値に達する油剤厚さ η は変わるはずである。例えば μU を減少させれば η は小さくとも同じ g の値を得ることになる。著者らはこのようなことを実験的に確かめようと試みたが⁹⁾ 不十分であつた。また最初に述べたようなこのような理論では説明が不十分または困難な事実もある。しかしこの半定量的な理論は条件が適当な場合はすくなくとも定性的には実験事実を説明することができるものと思われる。

本報では摩擦物体の滑り速度を変えた場合、油剤付着量の摩擦挙動に及ぼす影響がどのように相違するかを液体油剤、固体油剤について調べた。そしてこの理論がどのようなところに現われるかをみた。

すでに述べたように条件が異なると油剤付着量の効果はいろいろな形で現われる。この原因として油剤付着量の変化は潤滑面の油膜厚さの変化をもたらす、これによつて生ずる油剤せん断比の相違からそこをせん断するに要するせん断強力に変化をきたすのが主要なものと考え

られ、本報ではこれについて調べることにする。そのほかいろいろな原因が考えられる。例えば付着量の増加が油剤液相の発現をもたらし摩擦増加させるといわれ⁹⁾、とくに摩擦物体に対する荷重が軽い場合は大きく影響するものとみられる¹⁰⁾。これについては次報で述べることにする。あるいは油剤付着量の増加は摩擦物体に対する油剤の浸透を増加させ、asperityの軟化をもたらし、結局摩擦接触面積の増加とせん断強度の低下となり摩擦に複雑に影響するといわれる^{2, 8)}。糸のような繊維の複雑な集合体においては、油剤付着量の増加が単繊維自体の摩擦を減じても、これが糸内繊維の滑りを助長し結局繊維と物体との接触を多くして摩擦が大きくなることもあるという説もある²⁾。このような複雑さをさける意味からも本報では単繊維を実験材料とした。

2. 実 験

比較的接触荷重の小さい場合としては、回転円筒に所定の繊維をベルト掛けし、その初張力と終張力を測ることから摩擦力を出すいわゆる Röder 法⁶⁾を用いた。ただし繊維張力の測定にはトーション・バランスのかわりにUゲージを用いた。試料繊維としてはP.E.T. (テトロン) 20dを用い、これを実験前にアルコール・ベンゾール(1:1)で8hrソックスレー洗浄した。回転円筒としてはなし地仕上によつて表面を粗くしたクロム・メッキ 24mmφを用い、これは実験前によく蒸留四塩化炭素によつて洗浄した。そのほか直接間接試料に触れる実験器具は蒸留四塩化炭素によつて洗浄した。高粘度の潤滑剤としてポリブテン (2,000 poise at 20°C)を用いこれをP.E.T. 5d|からなる清浄な繊維塊に所定%付着させ、ついで熱板上で暖めた円筒にこのワタをこすりつけて実験しようとする円筒とした。油剤付着後30min以上してから実験を始めた。測定前ベルト掛けした試料繊維をよく円筒になじませ(20sec程度)繊維にも油剤を付けるようにした。初張力は1.0gで滑り速度は6~27cm/minとした。同一条件の実験を約10数回繰り返してその平均をもつて測定値とした。測定時の温湿度は20°C, 60% RHとした。

接触荷重の大きい場合としては、ガラス板上に繊維を滑らせることから摩擦力を測る方法を用いた。繊維としてはナイロン 88d(0.1mmφ)を用い、これを真ちゆう板で作った3点支持スライダの支持点にそれぞれ巻きつけ所定のスライダとした¹¹⁾。このスライダを顕微鏡用スライド・ガラスの上をすべらせその運動摩擦をUゲージによつて測つた。実験に用いたスライド・ガラスはまず石けんでよく洗浄し、アルコール・ベンゾール(1:1)を用いて数hrソックスレーの装置によつて洗浄した。

スライダも同様にアルコール・ベンゾールでソックスレー洗浄した。そのほか実験に際して直接間接摩擦面と触れるものはソックスレーまたは蒸留四塩化炭素で洗浄した。きれいにしたテストピースは大型シャーレの中にもうけたガス焰であぶつて清浄にした白金線の台の上にたくわえた。油剤としてはポリブテン、固体パラフィン(融点 60°C)、カプリル酸銅を用いた。これをP.E.T. 5d|からなる清浄なワタに所定%付着させ、ついで熱板上で暖めたスライド・ガラスにこの繊維塊をこすりつけて実験しようとする固定試片とした。これを油剤付着後30min以上たつてから実験に供した。水平にした重い鉄板上に清浄なる紙を敷き、その上に実験をしようとする固定試片をのせ、スライダをのせた。測定に先だつて繊維の荷重変化によるヒステレシス、荷重時間によるクリープを除くため所定の荷重を数分間かけた。滑り速度は0.0083~1.5cm/secで1測定の滑り距離は約4cmとした。この間の運動摩擦の平均を読みこれを数度から10度程度繰り返した。これらの測定はできるだけ固定試片の処女面を用いるようにした。測定時の温湿度は20°C, 65% RHとした。

3. 結果と考察

3.1 液体油剤を用いた場合

液体油剤を用いた場合は条件が適当であるならば流体潤滑になるから^{1, 2)}、これから出発して徐々に条件を変えた場合流体潤滑の理論から推定されることがどのように現われるかを見てみよう。

Fig. 1はポリブテンによつて潤滑したなし地仕上円筒上にP.E.T. (テトロン) 20dを滑らせたときの油剤付着量に対する摩擦係数を示す。この摩擦係数は摩擦係数が荷重によつて変わらないとして終張力、初張力から形式的に計算したものである。油剤付着量3.0%のときは滑り速度の変化に対する摩擦力和摩擦指数から完全な流体潤滑になっているものと推定される¹²⁾。このような完全な流体潤滑から油剤付着量を減少させて行くと、流体潤滑下にあるのならば摩擦の増加が期待されるはずである。滑り速度6cm/minにおいてはこれが現われている。そして滑り速度が大きい場合はこの摩擦増加の始まりが大きい油剤付着量で起こるものと考えられる。一方付着量の減少は摩擦の減少も引き起こすものとみられる。これら摩擦の増加傾向と減少傾向の両者が合わさつたため滑り速度27, 21cm/minにおいては摩擦増加がみられないのではないかと解釈される。付着量減少に対する摩擦減少は潤滑面の油膜厚みの減少によつてせん断比が増加し、これによつて油剤がスリップを起こし粘性流体として作用しなくなるためではなからうか。完全に

Fig. 1. Variations of the coefficient of friction with the percentage of lubricant addition. P. E. T. fibre (20d) slides around a mat finished cylinder, lubricated with polybutene.

流体潤滑下にあるものを滑り速度を増加させて行くと、摩擦が理論値よりも低くまたは減少することのあるのは¹⁾やはりこのためなのだろう。滑り速度が速い場合高い付着量から摩擦が減少し、そして大きく減少するのはこれを裏づけている。

接触荷重が比較的小さい場合として Fig. 1 を示した

ので、大荷重の場合について Fig. 2 を示す。ポリブテンによつて潤滑されたガラス板上を3点支持スライダに加工されたナイロン 88 d が荷重 100 g で滑るとき油剤付着量に対する摩擦係数の変化を各滑り速度について示している。Fig. 2 に用いたのと同じデータを滑り速度について示すと Fig. 3 を得る。流体潤滑の理論¹²⁾から、摩擦係数と滑り速度をそれぞれ対数にとるとグラフは (1-摩擦指数) を勾配とする直線となることが流体潤滑を表わす必要条件の1つであつた。したがつて Fig. 3 では滑り速度がある程度以上ならば油剤付着量が増加するにつれて流体潤滑に近づくことが、グラフの直線性と推定摩擦指数 0.8 からわかる。よつて Fig. 2 で滑り速度が速いときは Fig. 1 で低速の場合と同様に油剤付着の減少につれて流体潤滑理論の示すような摩擦の増加が起こり、ついで油剤スリップの効果が現われて摩擦は減少し

ているものと考えられる。そしてこれらのグラフから摩擦増加の始まる付着量は高速におけるほど大きいことが推察できる。滑り速度の低いときは流体潤滑となり得ないから付着量減少による摩擦の増加は流体潤滑理論の示すものとは異質の原因によるものと思われるが、やはり定性的には類似の効果すなわち油剤のくさび作用による

Fig. 2. Variations of the coefficient of friction with the percentage of lubricant addition. Nylon fibre (88d) slides on glass plate lubricated with polybutene.

Fig. 3. Variations of the coefficient of friction with the sliding speed. Nylon fibre (88 d) slides on glass plate lubricated with polybutene.

Table 1. Variations of the coefficient of friction with the time of ageing. Nylon fibre (88 d) slides on glass plate lubricated with polybutene at speed 0.1 cm/sec.

Addition %	Time after lubricating					
	0~10 min.	30~40 min.	60~70 min.	120~130 min.	24 hrs	30 min. aged at 60°C
0.2	0.363					0.327
20	0.121	0.116	0.117	0.119	0.121	0.142

潤滑膜厚さの変化によって説明できるものと考えられる。このようにして油剤付着量の効果は潤滑膜の厚さとそのせん断特性から説明できるように思われる。そして同一油剤についても滑り速度を変えると油剤付着量の変化に対する摩擦の変化はすでに述べた3種類の型を示し得ることがわかった。

以上の実験結果は荷重が大きいときのものだったので asperity 変形面の潤滑面のみが摩擦に関与したとしても大過ないものと思われるが、油剤の浸透による asperity の軟化^{2,8)} はどの程度摩擦に影響するのであろうか。これを調べるため Fig. 2, 3 と同一条件で油剤付着後時間の経過とともにどのように摩擦が変わつてゆくかを測つた。60°C, 30 min のエージングによつて長時間の時間経過にかえた。これを Table 1 に示す。滑り速度は 0.1 cm/sec とした。Fig. 2, 3 の実験は繊維に油剤が付着してから1時間程度で終了したので時間経過による摩擦変動は大勢に影響しないものとしてよいだろう。油剤付着量が少ないときは asperity 表層のみが軟化し、せん断強度のみが小さくなるので摩擦は減少するが、付着量が多いときは asperity の深部まで軟化して摩擦面との接触面積が大きくなるからむしろ摩擦は大きくなるという説を Rubenstein は主張している^{2,8)}。Table 1 でエージングした場合はこれが現われているが、もし短時間の

時間経過でこのようになるとしてもその大きさは Fig. 2, 3 の傾向を変えるほどではない。また滑り速度によつて付着量の効果は大きく変わるところから Rubenstein の主張は少なくとも一部分しか説明していないものと思われる。

3.2 固体油剤を用いた場合

固体油剤を潤滑剤としたときも液体油剤のときと定性的には類似の挙動をするかもしれないので比較のために固体油剤を用いたときの油剤付着量の効果を調べてみた。

融点 60°C のパラフィンで潤滑したガラス板上を3点支持スライダに加工したナイロン 88 d が荷重 1.35 g で滑るときの摩擦係数を Fig. 4 に示す。油剤付着量を減少させていつたとき摩擦増加の始まる付着量は滑り速度が速いときのほうがおそいときよりもわずかに大きいものとみられる。これから固体油剤で潤滑したときも流体潤滑の理論で予測されることが定性的には現われうることがわかった。そしてさらに付着量を減少させて行くと摩擦がさらに大きくなるのは流体潤滑の場合と同様である。すなわち付着量を減少させれば潤滑面の油膜厚さは薄くなると考えられるから、したがってそのせん断比は大きくなり、これに対するせん断力は大きくなるものと解釈される。

接触荷重の重いときとして荷重 100 g でカプリル酸銅を油剤としたときの同様な実験結果を Fig. 5 に示す。油剤付着量の減少に対して摩擦の増加が始まるのはこの場合ほぼ同じ付着量で、Fig. 4 の場合のような滑り速度による相違ははつきりしていない。カプリル酸銅は不良な潤滑剤と考えられ、また荷重も大きいのでこの場合は摩擦物体間の直接接触が起こっているものと考えられる。この直接接触は付着油剤厚みの増加によつて摩擦物体に対する油剤のくさび作用が大きくなり減少の傾向をとるものと考えられる。すなわち潤滑面の平均油膜厚さの増大をきたし、結局摩擦は小さくなる。油剤付着量の変化が潤滑面の油膜厚さを変えるという点では液体油剤の場合と同様である。Fig. 5 は対数グラフになつていたので付着量が減ると滑り速度の相違による差が縮まるのがわかるが、これはくさび作用の減少により物体の直接接触がより大きくなるためによるのかもしれない。

以上の実験では付着油剤の厚みは相対的なものであり、かつ精確を期し難いが、以上によつて油剤付着量の摩擦に及ぼす効果のある側面をとらえ得たものと思われる。油剤の種類を変えた場合異なつた結果が出るかもしれないが、油剤付着量に対する潤滑面の油膜厚さと滑り速度からそのせん断比が与えられ、これに対するせん断力から摩擦力の大部分が説明できるものと考えられる。

4. 結 言

油剤付着量に対する摩擦の変動を滑り速度を変えた場合について調べたことがわかつた。

1) 乾燥摩擦から出発して油剤付着量を増加させて行つたとき、一般に摩擦は最初急激に減少し、ついで増加する場合、増加後減少する場合、さらに減少する場合の 3 つの型が考えられる。液体油剤を用いた場合滑り速度を変えるのみでこの 3 つの型の現われることがあることがわかつた。

2) 油剤付着量を減少させて行くとき、それまではば

Fig. 4. Variations of the coefficient of friction with the percentage of lubricant addition. Nylon fibre (88 d) slides on glass plate lubricated with solid paraffine.

Fig. 5. Variations of the coefficient of friction with the percentage of lubricant addition. Nylon fibre (88 d) slides on glass plate lubricated with copper caprylate.

一定であつた摩擦が増加に転ずる付着量は滑り速度が速いほど大きい傾向がある。これは流体潤滑の理論が示すところと定性的に一致する。

3) 液体油剤を用いた場合油剤付着量の減少に対して摩擦が減少するのがみられた。これは油剤がスリップを起こし粘性流体として作用しなくなるためではないかと考えられる。

4) 結局油剤付着量に対する潤滑面の油膜厚さと滑り速度からそのせん断比が与えられ、これに対するせん断力から摩擦力の大部分が説明できるものと考えられる。

文 献

- 1) 久世栄一, 古島昭雄; 織学誌, 21, 57 (1965)

2) C. Rubenstein ; <i>J. Text. Inst.</i> , 54, T 234(1963)	8) C. Rubenstein ; <i>J. Appl. Phys.</i> , 32, 1445(1961)
3) " " 49, T 13(1958)	9) B. Olofsson, N. Gralen ; <i>Text. Res. J.</i> , 20, 467
4) E. Moss ; <i>Brit. J. Appl. Phys.</i> , sup. 1, 19(1951)	(1950)
5) 久世栄一, 古島昭雄 ; 繊維誌, 21, 1 (1965)	10) 久世栄一, 古島昭雄 ; 繊維誌, 20, 541 (1964)
6) H. L. Röder ; <i>J. Text. Inst.</i> , 44, T 247 (1953)	11) " , " ; " 21, 621 (1965)
7) D. G. Lyne ; " 46, P 112 (1955)	12) " , " ; " 20, 365 (1964)
-