ナイロンの摩擦挙動*

新保正樹** 越智光一***
伊藤和平*** 佐々木勝美***

Frictional Behavior of Nylons

by

Masaki SHIMBO, Mitsukazu OCHI, Kazuhira ITO and Katsumi SASAKI

(Faculty of Engineering, Kansai University, Suita)

Frictional behaviors of Nylons having different chemical structures were followed by observing the change of frictional coefficient in the glassy, transition and melt-flow regions of the system.

In the glassy region, a constant value of frictional coefficient was observed in spite of the variation in contact pressure. Only shearing fracture was observed in the region.

A good correlation was observed between the frictional coefficient and shearing modulus of elasticity or hardness of Nylons.

In the transition region, the maximum value of frictional coefficient was observed at T_g and T_m . Stick and slip behavior was also observed in the region.

A good correlation was observed between the maximum values of frictional coefficient and damping. Orientation of Nylon layer was also observed in the region.

(Received May 28, 1977)

キー・ワード：摩擦挙動，摩擦係数，動力学的性質，ナイロン

1 緒 言

高分子の摩擦については応用に関する研究が圧倒的に多いが、摩擦機構の究明には Bowden,^{1,2)} Tabor^{1,3)} ら以降半球スライダーを用いる方法がその主流をなしている。

しかし実際の摩擦は平面もしくは一定の曲率半径をもつ湾曲面で行われるのが普通である。したがって半球状スライダーを用いる方法がこのような平面または曲面の摩擦を研究するのに最もよい方法とは考え難い。

高分子の摩擦面を観察すると必ず破壊，変形もしくは流動などの痕跡が認められる。したがって高分子の摩擦を単なる表面現象として扱うのは不十分で，高分子層内部におよぶ破壊，変形もしくは流動などを考えるべきことが推定される。

在来高分子の摩擦と固体物性との相関を扱ったものには Flom^{5,6)} による転り摩擦と動力学的性質の相関や，Bartenev, Vinogradov⁷⁾⁻¹¹⁾ らによる融点と摩擦挙動に関する研究などがある。しかし後者は融点で摩擦係数の極大値が現れるとしているが，実測値には大きなズレが認められ，なお検討の余地が多い。¹²⁾

筆者らは前報で硬化度を異にする熱硬化性樹脂の平面摩擦を調べ，摩擦挙動と動力学的性質の間により相

関があることを示した。

本報では熱可塑性樹脂のうち高度結晶性をもつナイロンと金属との平面摩擦を追跡し，摩擦挙動と動力学的性質を中心とする固体物性との相関を明らかにしようとした。

2 実 験

実験装置には Fig. 1 (A) に示す平面型摩擦試験機を用いた。即ち水平においた高分子試料 (Fig. 1-(B), Fig. 1-(A)4) の上をモーター (Fig. 1-(A)7) によって駆動されるステンレス鋼製の摩擦子 (Fig. 1-(C), Fig. 1-(A)5) の下面が接触しながら回転する。このような回転円盤状摩擦子の形状と摩擦の関係は筆者の一人が検討を行った。¹³⁾

摩擦の測定にはロードセルと電磁オシログラフを用い，その値から摩擦係数と摩擦トルクを求めた。測定条件の範囲は滑走速度：0.5～60 cm/sec，荷重：2～45 kg/cm²，温度：室温～300℃とし，ふん囲気温度を上昇させるときの昇温速度は 0.5℃/min とした。

金属試料は18-8ステンレススチール (SUS-304，日本冶金) とし，高分子試料は Table I に示すナイロン6 (CM 1017，東洋レーヨン)，ナイロン6/6 (レオナ1200，旭化成)，ナイロン6/10 (CM 2001，東洋レーヨン) およびナイロン12 (L1801，ダイセル) を用いた。金属試料は図のごとく切削した後摩擦面を耐水研摩紙 #1000 を用いて水砥ぎし，その表面あらさは

* 原稿受理 昭和52年5月28日

** 正会員 関西大学工学部 吹田市千里山東

*** 関西大学工学部 吹田市千里山東

Fig. 1. Testing apparatus.

Table I. Some properties of Nylons.

Properties	Nylon 12	Nylon 6/10	Nylon 6	Nylon 6/6
Molecular weight	13 600	13 400	31 000	56 000
Crystallinity (%)	27.0	21.2	33.1	36.2
Density (g/cm ³)	1.02	1.06	1.14	1.14
Shear strength (kg/cm ²)	330	350	570	680
T_g (°C)	45	50	55	69
T_m (°C)	182~183	214~215	223~224	255~256
Hardness (Shore D scale)	59	60	63	69

Fig. 7-I に示した。高分子試料は図のごとき寸度に切削後そのまま測定試料とし、測定の度ごとに新しい試料を用いた。

試料の表面あらさは触針法による表面形状測定機により速度 0.1 mm/sec, 圧力 0.5 g で測定した。触針尖端半径は $4 \pm 1 \mu$ である。高分子の動力学的性質はねじれ振子型粘弾性測定装置(レスカ)により周波数 1 Hz, 昇温速度 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ で測定し、この値から融点 T_m とガラス転移温度 T_g を求めた。結晶度の測定は Price および Müller, Pfüger によった。摩擦面温度の測定は極めて困難であるから金属摩擦下端 (Fig. 1-(C)) に 40°C ~ 175°C で変色するサーモクレヨン(紫山科学) 9 種により、その変色から摩擦温度を知り摩擦面温度を測定しようとした。

3 結果および考察

3.1 ガラス状領域の摩擦

低速度 (1 cm/sec) で摩擦発熱の少ない状態のナイロンの摩擦を Fig. 2 に示した。

Fig. 2. Frictional properties of Nylons.

図のごとく 4 種のナイロンいずれも接触圧の変化 ($2 \sim 45 \text{ kg/cm}^2$) にもかかわらず動摩擦係数 μ_k は一定値を示し、摩擦温度もすべて 40°C 以下を示した。

これら 4 種のナイロンのガラス転移温度 T_g はいずれも 45°C 以上 (Table I) であることから、Fig. 2 の摩擦挙動はこれらナイロンのガラス状領域の摩擦と考えられる。もちろんガラス状領域とはいえナイロン結晶は存在する。この場合ナイロン表面はせん断破壊と考えられる状態で、ナイロンの金属への凝着が少量にすぎぬことから破壊は金属とナイロン面の凹凸のかみ合いによるせん断破壊と考えられる (Fig. 5-(B))。

3.2 転移領域の摩擦

速度を増加させ ($1 \sim 60 \text{ cm/sec}$)、摩擦発熱を増加

Fig. 3. Frictional properties of Nylon 12.

させたときのナイロン12の摩擦挙動を Fig.3 に示した。

最も速度の低い場合 (1 cm/sec) には接触圧が変化 (2~45 kg/cm²) しても μ_K は一定値を示し, 摩擦子温度も40℃以下であった。速度をやや増加 (5 cm/sec) してもこの傾向は変わらず, 摩擦子温度も40℃以下であったが, μ_K は一定値のまま僅かに増大した。これら二つの場合ともに摩擦子温度は40℃以下でガラス状領域に相当し, ナイロン表面はせん断破壊と考えられる状態であった。この場合の金属摩擦子へのナイロンの付着量は少く, 主として金属とナイロン面の凹凸の組み合わせによるせん断破壊と考えられる。

速度を順次増大させ (20, 30, 45および60 cm/sec), 摩擦発熱を増加させると μ_K が一定値を示す領域はみられなくなり, μ_K には二つの極大値が現れるようになる。これらのうち一つの極大値はやや不明りょうでピーク高さも低く, 摩擦子温度も低い。

これに対して他の極大値はピーク高さも高く, 摩擦子温度も155℃を越える。しかも速度増加とともにこの極大値は大きくなり, かつ低接触圧側に移行する。

これらの挙動はナイロン6, 6/6 および 6/10 のいずれについても共通であった (図省略)。

筆者らは硬化度を異にする熱硬化性樹脂の摩擦で, μ_K の極大値はそれぞれの硬化物の T_g で現れることを示した。¹²⁾

ナイロン4種の T_g は Table I のごとく45~69℃であり, T_m は182~256℃である。これと上記の事実を考えると, ナイロンの μ_K の極大値はそれぞれの T_g および T_m で現れるのではないかと考えられる。この推定については次節でのべる。

Fig.3 の二つの μ_K の極大値を示す温度域では, 摩擦力により接触面に沿って作用するせん断応力に直角方向の波状痕跡が認められた (Fig.5-(C), および (D))。同時に摩擦トルクには脈動が現れ (Fig.8), 金属表面へのナイロンの付着はほとんどみられず, この状態は“Stick and Slip”とよばれる凝着すべり現象に相当すると考えられる。またせん断応力に直角方向の波状痕跡も温度上昇に伴って軟化したナイロン面の上部が金属面に凝着してナイロン層上面の変形を招いた後離脱するために起るものと考えられる。

Fig.3 の μ_K の大きな極大値は速度が増加すれば低接触圧側に移行するが, そのピーク値よりも高接触圧側で摩擦発熱の多い領域では μ_K は急低下し, この領域では摩擦面には明りょうな流動痕跡が認められた (Fig.5(E))。

3・3 ふん囲気温度の上昇に伴う摩擦挙動の変化

前節の結果から μ_K の極大値はその T_g または T_m で現れるのではないかと推定に導かれる。

Fig. 4. Frictional properties of Nylons.

この推定を確かめるために低速 (0.5 cm/sec) および低接触圧 (6kg/cm²) で摩擦発熱を極力抑制し, ふん囲気温度を上昇させたときのナイロン4種の μ_K の温度分散を Fig.4 に示した。

図のごとく各ナイロンについて μ_K にはそれぞれ二つの極大値が観察される。

この μ_K の極大値をそれらナイロンの T_g および T_m (Table I) と比較すると, この両者の温度差は大部分が2~3℃以内, 最大でも5℃の範囲にすぎない。したがってナイロンの摩擦では μ_K の極大値は前報同様それぞれの T_g および T_m で現れるとみてよいであろう。¹²⁾

3・4 摩擦面の観察

ナイロンの摩擦挙動は前節までの結果から少なくとも (1)ガラス状領域の摩擦, (2)転移領域の摩擦 (T_g 域および T_m 域) および (3)流動域の摩擦の3者を区別することができる。また T_g 域と T_m 域の間に摩擦係数が極少を示す領域があるが, この領域での摩擦面はせん断破壊と考えられる痕跡を示した。

これらの挙動と摩擦面の状態がどのような関係にあるかを反射顕微鏡と偏光顕微鏡によって観察した。

Fig.5 には反射顕微鏡による観察結果を示した。

摩擦前の試料では切削による条痕が認められ (Fig.5 (A)), ガラス状領域の摩擦面にはせん断破壊痕跡が認められた (Fig.5(B))。

速度が上昇し, 摩擦発熱の増加した T_g 域および T_m

Fig. 5. Frictional traces of Nylon 12.

域では μ_K はそれぞれ極大値を示す (Fig. 3, 4). この領域の摩擦面は T_g 域 (Fig. 5 (C)) および T_m 域 (Fig. 5(D)) いずれについても摩擦力により接触面に沿って作用するせん断応力に直角方向の波状痕跡が認められた。

これはナイロンの一部が金属に凝着し、金属面とナ

イロン面の相対的な移動に伴って破壊または変形を伴う凝着すべり現象のためと考えられる。

速度やふん囲気温度が更に高くなれば μ_K は極大値を示した後急低下する (Fig. 3, 4). この領域では摩擦面に明りょうな流動痕跡が認められる (Fig. 5(E)).

同様な観察をナイロン 6, 6/6, および 6/10 につい

Fig. 6. Cross section of Nylon 12.

て行ったが各段階における挙動はすべて同様であった (図省略).

つぎにナイロンの摩擦面をミクロトームで切断し, その表面層の状況を偏光顕微鏡で観察して Fig. 6 に示した.

摩擦前のナイロンでは発達した球晶がその表面層にまで及んでいる (Fig. 6(A)). これに対して転移領域の摩擦ではナイロン表面から内部に約 100μ にわたって配向が認められ, 球晶も破壊されている (Fig. 6(B)).

これはナイロン表面が金属面に凝着され, 摩擦面のせん断応力によってその表面層が移動するために分子鎖は配向し, 球晶が破壊されるものと考えられる.

即ち転移領域の摩擦ではナイロン内部約 100μ にわたって摩擦の影響が現れるから, ナイロンの摩擦は表面のみの現象として扱うことは不充分で, 摩擦をその固体物性との関連で扱うべき根拠を示すといえよう.

3.5 表面あらさの測定

金属摩擦子とナイロン12の表面あらさを Fig. 7 に示した.

摩擦前のナイロン表面は切削による微細な粗面であるが (Fig. 7(I)(A)), ガラス状領域の摩擦後の表面あらさはやや増大する (Fig. 7(II)(B)). これは表面におけるせん断破壊の結果と考えられる (Fig. 5(B)).

T_g 域の摩擦後の表面は更にあらくなり (Fig. 7(II)(C)), 粗面の山の数は減少する. T_m 域の摩擦後もこの傾向はほぼ同様であるが (Fig. 7(II)(D)), 流動域の摩擦後の表面は極めてあらくなり, その起伏は 20μ 程度に達した (Fig. 7(II)(E)).

同様な測定をナイロン6, 6/6および6/10について行ったが各段階における表面形状の傾向はすべて同様であった (図省略).

3.6 摩擦トルクの測定

電磁オンログラフによるナイロン12の摩擦トルクの時間的変化を Fig. 8 に示した.

Fig. 7. Geometrical changes of metal and Nylon 12 surface.

ガラス状領域の摩擦ではトルク値も小さく, その変動幅は極めて小さい. しかもトルク値は時間の経過にかかわらず一定値を示した (Fig. 8(A)).

この傾向はナイロン表面の粗面の山が金属と接触し (Fig. 7), 絶えず小面積のせん断破壊が繰返されるためと考えられる (Fig. 5 (B), 8 (A)).

T_g 域の摩擦ではトルク値は増大し, その変動幅も大きくなる. しかもこの変動状態はかなりの時間維持される (Fig. 8(B)).

この状態はナイロン表面の一部が金属面に凝着し, その破壊や変形と再凝着が繰返されるためと考えられ, 凝着すべり現象に該当すると考えられる.

T_m 域の摩擦ではトルク値は急上昇して極大値を示

Fig. 8. Frictional characteristics of Nylon 12.

した後に急低下する。この極大値を経た後のトルクの変動幅は大きく、この状態の摩擦面には流動痕跡が認められる (Fig. 5(E), 7(II)(E), 8(C))。

これはナイロン表面が T_m に達して μ_K の極大値を示した後流動に移行する事実を説明する。

同様な測定をナイロン6, 6/6および6/10について行っても、各段階における挙動はすべて同様であった (図省略)。

3・7 摩擦挙動と高分子物性

Fig. 8 にはナイロンのガラス状領域における μ_K の一定値 (Fig. 2) とそのせん断弾性率の関係を示した。

図のごとく μ_K とせん断弾性率との間にはほぼ直線関係が認められる。

同様にナイロンの μ_K の一定値 (Fig. 2) とその硬さとの間にも同様な直線関係が認められた (図省略)。

Fig. 9. μ_K vs. shear modulus for Nylons.

切削仕上げしたナイロン表面は粗面で (Fig. 7(II)(A)), この粗面の山の頂点が金属面と接触する。この場合、接触圧が一定ならばナイロンの弾性率またはかたさの大きいものほど粗面の山の頂点は変形しにくく、金属との接触面積は小さくなるはずである。

摩擦の測定ではナイロンと金属面は互いにせん断方向に移動し、両者の接触面積が小さいほどせん断破壊抵抗値は小さくなるはずである。摩擦係数として測定される値はこのせん断破壊抵抗値であるために、ナイロンの弾性率やかたさと μ_K の値 (Fig. 2) との間に直線関係が成立するものと考えられる。事実、顕微鏡観察の結果からも、弾性率またはかたさの大きいナイロンほどせん断破壊をうける面積が小さい傾向が認められる。

Fig. 10 には T_g における μ_{Kmax} と $\tan \delta_{max}$ との関係を示した。 T_g では μ_K も $\tan \delta$ もともに極大値を示し、両者の間にはほぼ直線関係が認められる。

Fig. 10. μ_{Kmax} vs. $\tan \delta_{max}$ for Nylons at glass transition temperature.

即ちガラス転移温度での μ_K はその減衰の大きさに支配されることになる。いいえれば力学的エネルギーが最も多く熱に変換される点で動摩擦係数は極大値をとるということもできよう。

4 結 論

結晶性高分子の例としてナイロン類を選び、速度、接触圧およびふん囲気温度をかえてその摩擦挙動を追跡した。

これらの結果をナイロンの動力学的性質および力学的性質と比較したほか、表面あらさと摩擦面の顕微鏡観察の結果と対照し、摩擦挙動とこれら諸性質の関係を検討した。

その結果、ナイロンと金属との平面摩擦挙動を次の

ごとくまとめてよいであろう。

(1) ガラス状領域の摩擦

低速度で摩擦発熱が少く、ふん囲気温度が低く、ナイロンが T_g 以下の温度における摩擦はガラス状領域の摩擦と考えられる。

この領域では動摩擦係数は接触圧の変化にかかわらず一定値を示し、摩擦面にはせん断破壊痕跡が認められた。

この領域における動摩擦係数はナイロンの弾性率もしくはかたさといふ相関を示した。

これはナイロンの弾性率やかたさがその粗面頂点と金属との接触面積を支配し、この接触面積の大小がせん断破壊抵抗値、即ち摩擦係数を支配するためと考えられる。

(2) 転移領域の摩擦

温度が上昇して摩擦発熱が増加するか、もしくはふん囲気温度が上昇してナイロンがその転移温度に達すると、摩擦係数には極大値が現れ、凝着すべり現象が観察される。

この挙動はガラス転移温度および融点の双方で観察され、摩擦係数の極大値を示す温度はそれぞれのナイロンのガラス転移温度および融点に一致するものと考えられる。

ガラス転移温度における摩擦係数の極大値と減衰の極大値との間にはよい相関が認められた。

さらに転移領域の摩擦ではナイロン表面層約 100 μ にわたって配向と球晶の破壊が認められた。

これらの事実はナイロンの摩擦は単なる表面現象として扱うだけでは不十分で、その固体物性との相関に

おいて論ずべきことを示している。

(3) 流動域の摩擦

速度上昇に伴う摩擦発熱の増加、もしくはふん囲気温度の上昇に伴ってナイロン表面には流動痕跡が認められ、表面層の熔融流動が認められた。

参 考 文 献

- 1) Bowden, F. D., and D. Tabor, "The Friction and Lubrication of Solid", (1950).
- 2) Bowden, F. D., and D. Tabor, "The Friction and Lubrication of Solid II", (1964).
- 3) Tabor, D., and C. M. Pooley, Proc. Roy. Soc., A **329**, 251 (1972).
- 4) Tabor, D., and D. E. Weyne, Wear **4**, 391 (1961).
- 5) Flom, D. G., J. Appl. Phys., **31**, 306 (1960).
- 6) Flom, D. G., J. Appl. Phys., **32**, 1426 (1961).
- 7) Bartenev, G. M., and A. J. Elkin, J. Polym. Sci., Part C, **16**, 1673 (1967).
- 8) Vinogradov, G. V., and G. M. Bartenev, Brit. J. Appl. Phys. **2**, 1687 (1968).
- 9) Bartenev, G. M., A. J. Yel'kin, and V. N. Nikolaev, Vysokomol soyed., A **10**, 808 (1968).
- 10) Vinogradov, G. V., Yu. G. Yanovsky, E. I. Frenkin, Brit. J. Appl. Phys., **18**, 1141 (1967).
- 11) Vinogradov, G. V., G. M. Bartenev, A. I. El'kin, and V. N. Mikh'aylov Wear **10**, 213 (1970).
- 12) 新保正樹, 水本康博, 越智光一, 高分子学会論文集, **32**, 465 (1975).
- 13) 新保正樹, 雪氷, **21**, 139 (1959).
- 14) Price, P., J. Chem. Phys., **19**, 973 (1951).
- 15) Müller, A., and R. Pflüger, Plastics **24**, 350 (1959).