

## 高分子材料の摺動特性と振動に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/16178">http://hdl.handle.net/2297/16178</a>

氏 名	劉 叢 民
生 年 月 日	
本 籍	中国
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博甲第269号
学位授与の日付	平成10年9月30日
学位授与の要件	課程博士 (学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	高分子材料の摺動特性と振動に関する研究
論文審査委員	( 主 査 ) 内山 吉隆 ( 副 査 ) 新宅 救徳, 梶川 康男, 山田 良穂, 石田眞一郎

## 学 位 論 文 要 旨

The purpose of this study is to investigate the mechanism of the friction-induced vibrations for polymers. In the experiments the influences of various parameters, such as sliding speed, contact pressure, temperature and viscous damping factor of the measuring system, on the vibrations were examined.

The theoretical analysis indicates that the friction-induced vibrations are mainly appeared when the friction coefficient - sliding speed curve ( $\mu$ - $V$  curve) show zero or negative slope. The occurrence of vibrations are also indicated to be affected by load and viscous damping of the measuring system.

Experiments were made using a pin-on-disk type tribometer, which was able to measure friction coefficient under constant speed and decelerating speed. The decelerating speed method was convenient to measure the friction coefficient in the wide range of sliding speed. From the experiments, it is found that friction stability is mainly depended on the slopes of  $\mu$ - $V$  curves. The negative slope of  $\mu$ - $V$  curve for polyamide 66 (PA 66) was observed at low contact pressure and room temperature, where as the slope turned to positive slope with the increment of the contact pressure or temperature. Then, the friction vibration tends to disappear. Polytetrafluoroethylene (PTFE) and polyacetal (POM) showed positive slopes in the  $\mu$ - $V$  curves for the wide rang of speed. At that time the friction-induced vibrations were not observed even if the contact pressure or temperature were raised. The viscous damping factor of the measuring system and the uneven transferred films on the mating disk surface also play an important role on the friction-induced vibration.

### 1. 緒 言

相互にすべり合う材料の間には摩擦振動を生じることがある。しかし、機械の高性能化を図るためには、摺動部品の摩擦振動が発生せず、滑らかにすべりを実現することが重要な課題である。そこで、本研究では高分子材料の摩擦振動の発生機構を明らかにすることを目的とした。そして、摩擦振動に影響する諸因子、すなわち、摩擦速度、接触圧力、静摩擦の停止時間依存性、摩擦面温度、摩擦測定系の粘性減衰係数などに注目し、摩擦振動の現象を実験的に探求するとともに、その発生機構について理論的解明を行った。

### 2. 摩擦振動の発生機構

一般に、摩擦係数と摩擦速度との関係を示す曲線 ( $\mu$ - $V$  曲線) が負の傾きを示す時に自励振動が発生しやすい。本研究では、単純な減衰摩擦系の運動方程式に基づき、摩擦安定性の判別式(1)を導いた。

$$\begin{cases} \frac{c}{P} + \mu'(V) > 0 & \text{収束} \\ \frac{c}{P} + \mu'(V) \leq 0 & \text{不安定} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $c$ は粘性減衰係数、 $P$ は荷重、 $\mu'(V)$ は $\mu-V$ 曲線の勾配である。その判別式より、 $\mu-V$ 曲線の勾配 $\mu'(V)$ と系の粘性減衰係数 $c$ を荷重 $P$ で除した値の和が正のとき安定であり、負または零のときに不安定であることがわかる。特に、図1に示すように、PA 66の実測した $\mu-V$ 曲線から求めた勾配 $\mu'_c$ が $c/P$ に等しく、そこで摩擦振動するとき、勾配 $\mu'(V)$ の値は相対速度の関数として変動するので、判別式(1)は正と負両方の値をとって、振動系は減衰と発散が共存する自励振動となる。振動方程式の数値解析の結果、測定値により近い解を得ることができた(図2)。さらに、ある速度範囲での $\mu-V$ 曲線が得られている場合、勾配の計算から、判別式に基づき、摩擦振動発生の有無を簡便に判定ができた。

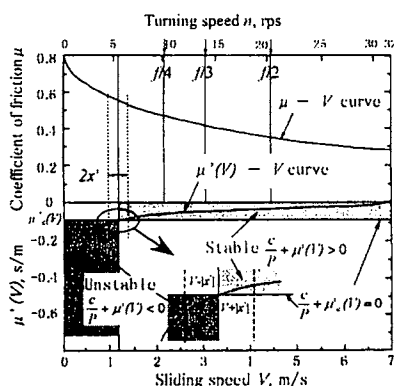


図1  $\mu-V$  曲線の勾配、摩擦振動の速度範囲及び摩擦の安定と不安定の領域 (PA 66、 $P=2.5\text{N}$ 、 $k=6.7\text{N/mm}$ )

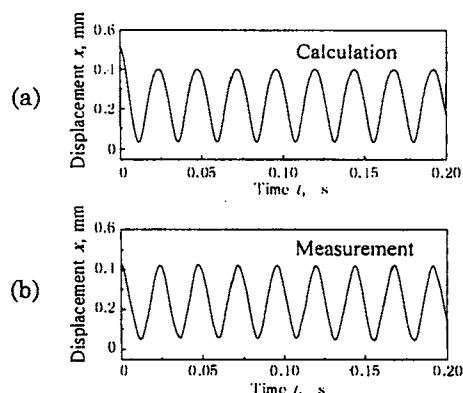


図2 摩擦振動の数値解析結果 (a) と実測結果 (b) (PA 66、 $V=1.0\text{m/s}$ 、 $P=2.5\text{N}$ 、 $k=6.7\text{N/mm}$ )

### 3. 各試料の $\mu-V$ 曲線の勾配と摩擦振動との関係

実験には、3種類の高分子材料、ポリアミド66 (PA 66)、ポリアセタール (POM)、四ふつ化エチレン樹脂 (PTFE) を使用し、金型鋼ディスク板と摩擦した。図3(a)に、慣性式摩擦試験法で高速度から停止するまでの測定で得られた各試料の $\mu-V$ 曲線の結果を示す。PTFE の場合は広い速度範囲で摩擦が安定しており、POM の場合は振動が少しあっても摩擦が比較的に安定している。しかし、PA 66 の場合は大きな摩擦振動が発生している。図3(b)は、図3(a)の結果を平均化した $\mu-V$ 曲線であり、POM と PTFE の摩擦に振動が少なく安定なのは、 $\mu-V$  曲線の正の勾配によるものであり、PA 66 の摩擦振動の発生は負の勾配によることがわかる。以上より、各試料の $\mu-V$  曲線の勾配と振動発生条件との間に密接な関係があることを検証した。

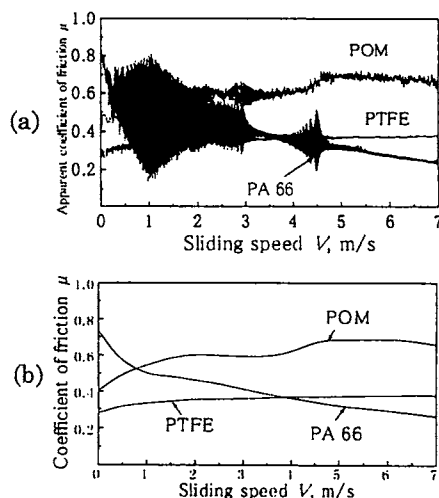


図3 各試料の実測した $\mu-V$  曲線 (a) と平均化した $\mu-V$  曲線 (b)

#### 4. 定速式と慣性式測定方法の比較

各試料の $\mu-V$ 曲線を正確に把握するために、ピン-ディスク型の慣性式(フライホイールの慣性を利用し、高速度から停止するまでの摩擦係数を測定可能)と定速式(種々の一定速度で摩擦係数を測定可能)の両用摩擦試験装置を用い、それぞれから得られた摩擦特性の比較を行った(図4)。POMとPTFE(図4(a))では、両測定法でほぼ同様な $\mu-V$ 曲線を得るのに対して、PA 66(図4(b))では定速式の方が高速度で高いディスク温度と高摩擦係数を示した。そして、慣性式の結果とは大きな差異が見られている。短時間で実験が終了する慣性式方法はディスク温度が大きく変わらず、 $\mu-V$ 曲線の測定が簡便にできることを確認した。それに比べ、定速式の高速度での測定は、定常状態の摩擦係数に達するまで実験を行ったため、摩擦熱の影響を受けやすいことがわかった。

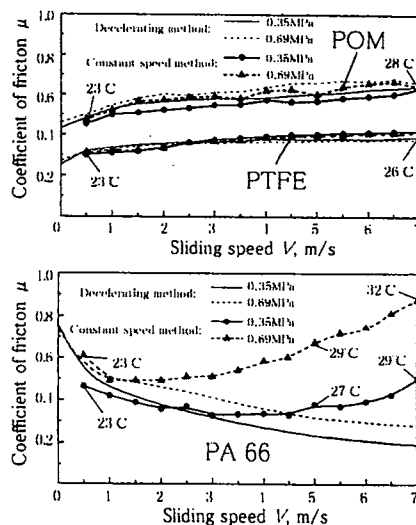


図4 慣性式及び定速式摩擦試験装置で得られた各試料の $\mu-V$ 曲線の比較: (a) POMとPTFE、(b) PA 66

#### 5. 低速度時の、各種高分子材料のスティックスリップ振動と黄銅の場合との比較

低速度領域での摩擦振動は、スティックスリップの形となる場合がある。図5に示すように、PTFEとPOMは正の勾配の $\mu-V$ 曲線を持ち、スティックスリップが生じなく、PA 66は黄銅と同様に、 $\mu-V$ 曲線の負の勾配に対応して、スティックスリップが発生することを確認した。

中程度の接触圧力で、PA 66のスティックスリップ振動は、摩擦速度の増加とともに低減する(図6(a))。これは材料の静摩擦係数が接触時間が短いほど減少し、静摩擦係数と動摩擦係数の差が速度増加とともに減少したためである。高接触圧力では、より複雑な変化を示している。そして、面圧の増加によりスティックスリップ振幅が減少し、振動発生し始める速度が高くなる傾向を示した。一方、黄銅では高面圧ほど振幅が増大し、高速度で減少する傾向を示した(図6(b))。

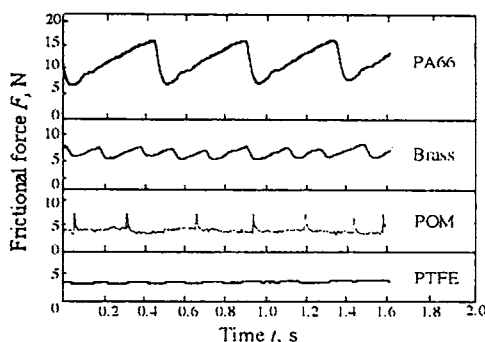
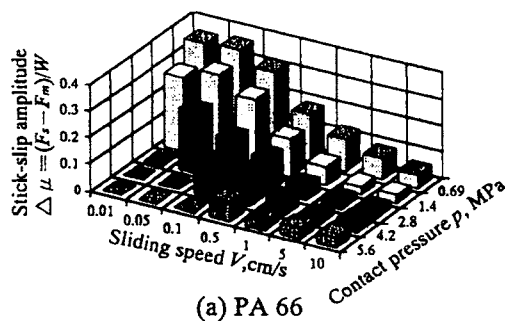
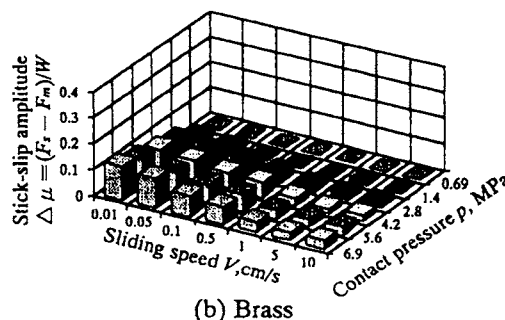


図5 各種試料のスティックスリップ形態  
 $p=2.77\text{MPa}$ ,  $V=0.075\text{cm/s}$ , 室温.



(a) PA 66

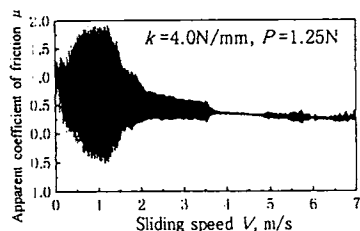
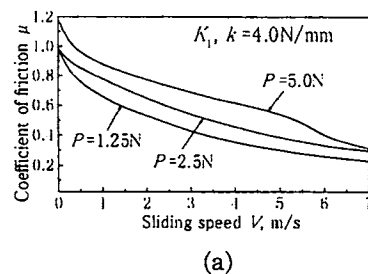


(b) Brass

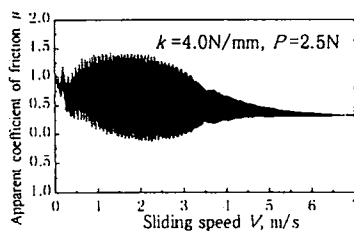
図6 摩擦速度及び接触圧力によるPA 66(a)および黄銅(b)のスティックスリップ振幅の比較

## 6. 各試料の $\mu-V$ 曲線と摩擦振動に及ぼす荷重(接触圧力)の影響

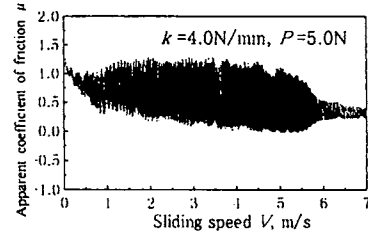
PA 66 の場合、荷重(または接触圧力)が $\mu-V$ 曲線と摩擦振動に強く影響する。図 7 には最も弱いばね( $k=4.0\text{N/mm}$ )を用いたときの摩擦測定系の結果を示したものであり、荷重増加に伴い $\mu-V$ 曲線の負の勾配がやや緩やかになる(図 7(a))。そして、荷重の増加は、一般的に摩擦振動を発生させやすくする傾向があり、また、振動発生時の速度範囲を広げる傾向がある(図 7(b)–(d))。一方、振動発生時の最大振幅を減少させる傾向があることがわかった。



(b)



(c)

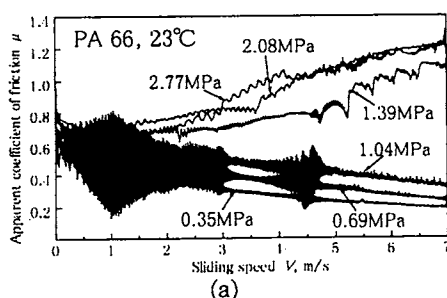


(d)

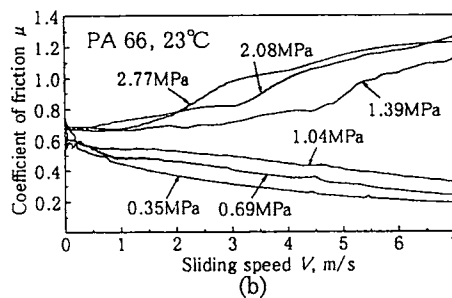
図 7 PA 66 試料の荷重(面圧)による $\mu-V$ 曲線及び摩擦振動の変化：(a)は平均化した $\mu-V$ 曲線，(b)～(d)は実測した $\mu-V$ 曲線；(b)1.25N(0.18MPa)，(c)2.5N(0.35MPa)，(d)5.0N(0.69MPa)。(室温 23℃，測定系のばね定数  $k=4.0\text{N/mm}$ )。

図 8(a)はより強いばね系( $k=6.7\text{N/mm}$ )を用いた PA 66 の実測結果を示したものである。実測した $\mu-V$ 曲線には低面圧で振動があるが、面圧の増加に伴い振動は見られなくなる。対応する平均した $\mu-V$ 曲線(図 8(b))の勾配が、面圧の増加とともに負から正になり、この勾配の変化が摩擦振動を消滅させることがわかる。

POM と PTFE の場合には、図 9 と図 10 に示すように摩擦特性が面圧の影響を受けず、正の勾配の $\mu-V$ 曲線が変わらないので、摩擦振動は生じにくい。

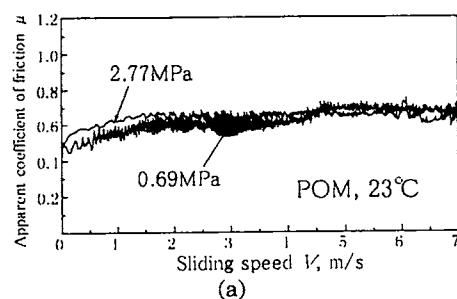


(a)

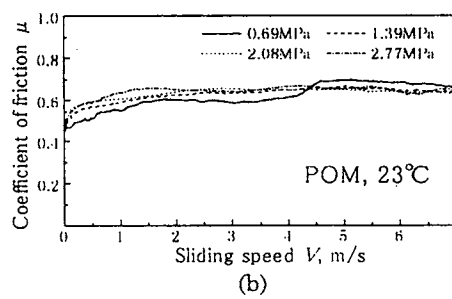


(b)

図 8 PA 66 試料の各接触圧力における $\mu-V$ 曲線：(a)実測した各 $\mu-V$ 曲線，(b)平均した各 $\mu-V$ 曲線。(室温(23℃)，測定系ばね定数  $k=6.7\text{N/mm}$ )



(a)



(b)

図 9 POM の各接触圧力における $\mu-V$ 曲線：(a) 0.69MPa と 2.77MPa ときの実測した $\mu-V$ 曲線，(b) 平均した 0.69MPa から 2.77MPa までの $\mu-V$ 曲線。(室温(23℃)，測定系ばね定数  $k=6.7\text{N/mm}$ )

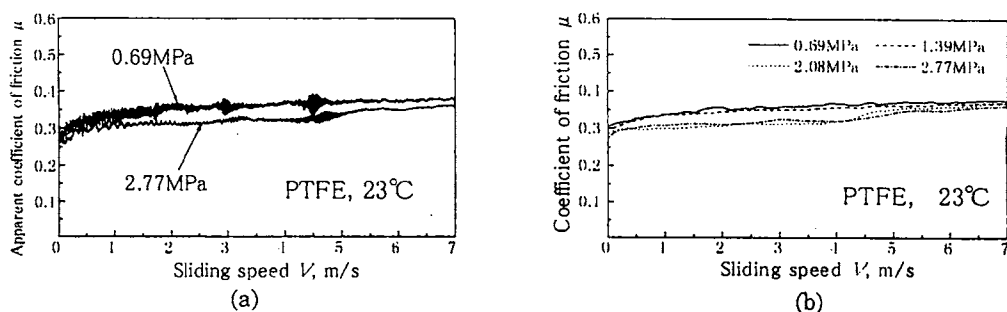


図 10 PTFE 試料の各接触圧力における  $\mu-V$  曲線: (a) 0.69MPa と 2.77MPa ときの実測した  $\mu-V$  曲線, (b) 平均した 0.69MPa から 2.77MPa までの  $\mu-V$  曲線. (室温 (23°C)、測定系ばね定数  $k=6.7\text{N/mm}$ )

## 6. 各試料の $\mu-V$ 曲線および摩擦振動と温度の関係

図 11 から図 13 は、温度を変化させたときの PA 66、POM、PTFE の  $\mu-V$  曲線を示したものであり、面圧を変化させたときの傾向とよく似ている。図 11(a) に示した PA 66 の場合には、温度の上昇とともに摩擦振動が大きな振動から消失に転じて、対応する平均した  $\mu-V$  曲線 (図 11(b)) の勾配が負から正になる。POM と PTFE の場合には図 12 と図 13 に示すように、 $\mu-V$  曲線が温度の影響をあまり受けて、摩擦振動は生じにくかった。

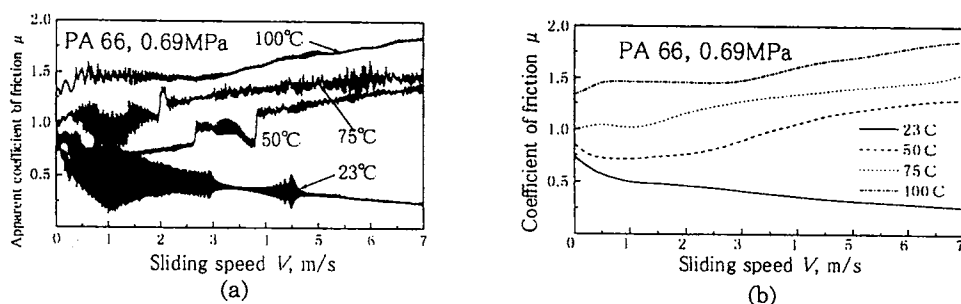


図 11 PA 66 試料の各温度における  $\mu-V$  曲線: (a) 各温度で実測した  $\mu-V$  曲線, (b) 平均化した各  $\mu-V$  曲線. ( $p=0.69\text{MPa}$ 、測定系のばね定数  $k=6.7\text{N/mm}$ )

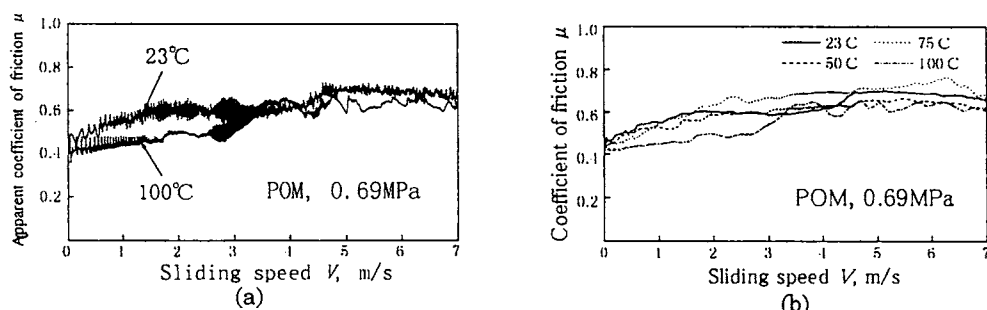


図 12 POM 試料の各温度における  $\mu-V$  曲線: (a) 23°C と 100°C で実測した  $\mu-V$  曲線, (b) 平均した 23°C から 100°C までの各  $\mu-V$  曲線. ( $p=0.69\text{MPa}$ 、測定系のばね定数  $k=6.7\text{N/mm}$ )

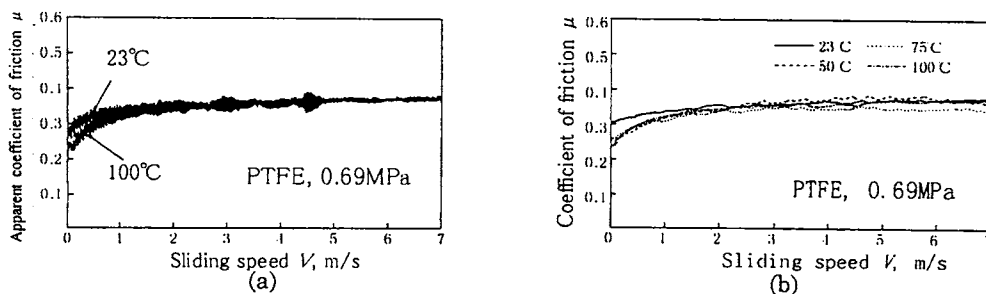


図 13 PTFE 試料の各温度における  $\mu-V$  曲線: (a) 23°C と 100°C で実測した各  $\mu-V$  曲線, (b) 平均した 23°C から 100°C までの各  $\mu-V$  曲線. ( $p=0.69\text{MPa}$ 、測定系のばね定数  $k=6.7\text{N/mm}$ )

## 7. 摩擦振動と摩擦測定系の粘性減衰係数の関係

図 14 は、3 種類のばね定数の異なる摩擦測定系を用いたときの PA 66 の摩擦係数と摩擦速度の関係 ( $\mu - V$  曲線) を示したものである。摩擦測定系の粘性減衰係数は、摩擦検出部の平行板ばね定数増加とともに増加する。そのため、図 14 に示すように、ばねが強くなると摩擦振動を抑制する傾向がある。

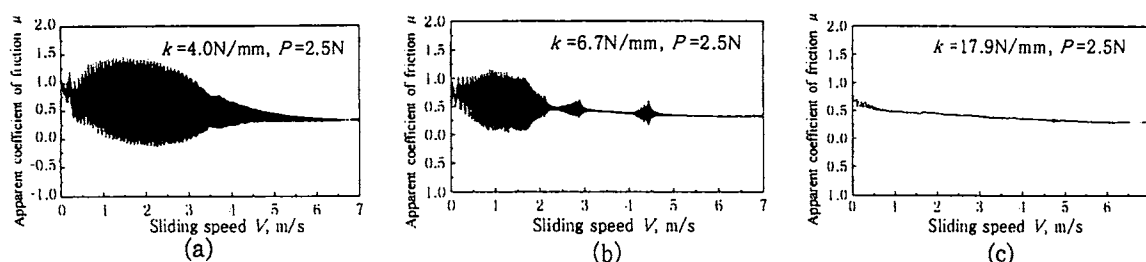


図 14 摩擦測定系でばね定数を変化させたときの PA 66 試料の速度による摩擦振動の変化：  
(a)  $k=4.0\text{ N/mm}$ , (b)  $k=6.7\text{ N/mm}$ , (c)  $k=17.9\text{ N/mm}$ . ( $23^\circ\text{C}$ ,  $P=2.5\text{ N}$  ( $p=0.35\text{ MPa}$ )).

## 8. 摩擦振動とディスク表面のうねりの関係

ディスクの表面にうねり、または、場所による移着物の不均一が存在するとき、ディスク軌道をスライダーが一周する間に摩擦力の変動が生じる。特に、ディスク回転数  $n$  のときにもたらされるうねりの周波数  $f_0$  が、ここで用いた平行板ばねの固有周波数 ( $f=42\text{ Hz}$ ) と合うときに共振が発生する。図 15 に示すように、本実験の速度範囲で、用いた 3 種類の材料 (PA 66, POM, PTFE) と、速度  $4.4\text{ m/s}$  ( $f_0=21\text{ Hz}$ )、 $3.0\text{ m/s}$  ( $f_0=14\text{ Hz}$ )、 $2.2\text{ m/s}$  ( $f_0=10.5\text{ Hz}$ ) 付近の 3 箇所で、共振が発生した。これらのうねりの周波数  $f_0$  が  $f/2$ 、 $f/3$ 、 $f/4$  に相当した。この振動が誘因となって、材料の  $\mu - V$  曲線の勾配が負のとき (例えば、PA 66 の場合) は自励摩擦振動が持続された。しかし、正の勾配を示す材料 (例えば、PTFE の場合) のときはその振動が抑制される傾向がみられた。

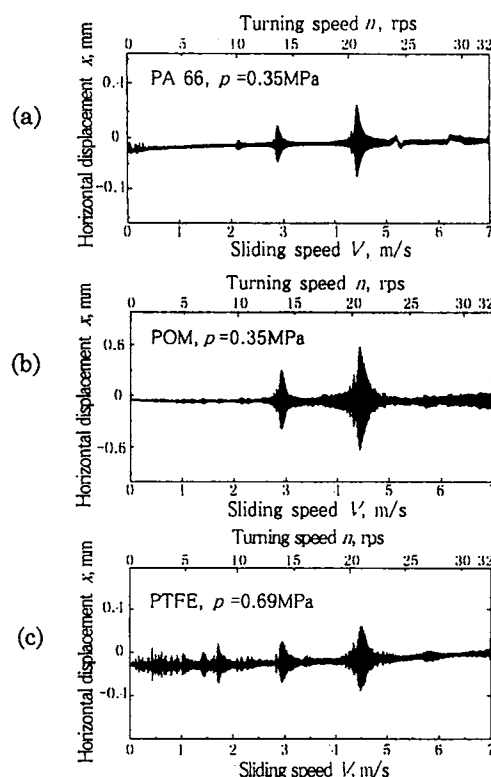


図 15 ディスクの表面うねりによる強制振動 (横軸は摩擦速度およびディスクの回転速度を示す。縦軸は各ピン試料のディスク板と平行な変位を示す)：(a) PA 66, (b) POM, (c) PTFE.

## 9. 結 言

摩擦振動の発生機構に関する理論解析を行うとともに、定速式と慣性式の摩擦試験機を用いて高分子材料の摩擦振動の発生する条件を実験によって調べた。高分子材料の摩擦振動現象は、 $\mu - V$  曲線の勾配、摩擦速度、静摩擦係数の停止時間依存性、接触圧力、摩擦面温度、摩擦測定系の粘性減衰係数、摩擦面のうねりなどの各種因子に影響されることを明らかにした。とりわけ、種々高分子材料の摩擦振動の発生は、接触圧力や温度で変化する、ポリアミド 66、ポリアセタール、四ふつ化エチレン樹脂などの固有な  $\mu - V$  曲線の勾配や摩擦測定系の粘性減衰係数に大きく支配されることがわかった。

## 学位論文審査結果の要旨

平成10年7月28日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関係資料について検討した。平成10年8月5日の口頭発表後、第2回学位論文審査委員会において協議の結果、以下の通り判定した。

本研究は、高分子材料の摩擦中に発生する摩擦振動について、理論的および実験的に解明を行ったものである。従来から、摩擦振動は静摩擦係数と動摩擦係数とに差があるとき、または、摩擦係数と摩擦速度との関係を示す曲線( $\mu-v$ 曲線)の勾配が負のときに発生することが知られているが、本研究では摩擦振動に影響する諸因子、すなわち、摩擦速度、接触圧力または荷重、静摩擦係数の停止時間依存性、摩擦係数の速度特性、摩擦面温度、摩擦系のばね定数および減衰係数、摩擦相手面のうねりなどに注目し、詳細な研究を行っている。不減衰摩擦系の場合は、 $\mu-v$ 曲線が負または零のとき振動するが、減衰のある摩擦系の場合には、運動方程式に基づいて、安定、不安定の判別式を導き、 $\mu-v$ 曲線の勾配 $\mu'(v)$ と粘性減衰係数 $c$ を荷重 $P$ で除した値の和が正のとき安定で振動せず、負または零のとき不安定となって振動することを明らかにし、実験で確かめている。

本研究は、高分子材料の摩擦振動発生機構を明らかにするとともに、実用上のブレーキやクラッチなどの摩擦振動を発生させないための摩擦材料や機構の設計に貢献するところ大であり、博士(工学)論文として十分に値するものと認定する。