

論 文

## ポリマーの摩擦帶電に対する分子運動の寄与

摩擦帶電したポリマーフィルムの熱刺激電流と分子運動との関連性からの評価

大 原 啓 司\*

(1978年7月29日受理)

### Contribution of Molecular Motion to Frictional Electrification of Polymers

Estimation by Thermally Stimulated Current Measurement  
of Rubbed Polymer Film

K. OHARA\*

(Received July 29, 1978)

Thermally stimulated current (TSC) was measured in a temperature range of 20 to 180°C for polystyrene films rubbed by nylon 6 films at 30 and 97°C. Complicated TSC curves were obtained. There was no effect of rubbing on the TSC above 140°C. A large peak appeared between 100 and 120°C in each TSC curve was related to the microbrownian motion of segments of polymer chains. An apparent activation energy for this TSC process corresponded to that for viscoelastic and dielectric  $\alpha$  dispersion of polystyrene. The peak temperature shifted to a higher temperature region and the activation energy increased with increasing number of rubbings. Other fine peaks observed in the same temperature range were closely connected with molecular chain scission and/or production of local strain in the surface layer of the film. In many cases, negative TSC was observed for the film rubbed at 30°C and positive TSC for the film rubbed at 97°C. The difference in sign of TSC may arise from the difference in charge distribution in the surface layer between the films rubbed at 30 and 97°C: at about the glass transition temperature of the sample the microbrownian motion of polymer segments is very active and the charge generated on the surface in the frictional electrification process is transported into the surface layer with the migration of polymer segments inside the film by the thermal motion. On the contrary, at the low temperature the thermal motion is frozen and the transport of the surface charge is very scarce. It was considered that this type of thermal motion at the interface contributes significantly to the frictional electrification.

#### 1. はじめに

ポリマーの摩擦帶電現象に関する研究は数多く存在する。これらの研究の大半では、2物質の相対的な移動という巨視的な運動形式が摩擦速度という形で考慮されているが、2物質の表面（層も含む）での分子の熱運動は

考慮されていない。しかし、2物質間の真の接触、電荷の移動を決定する要素としては物質表面での分子の熱運動が重要であると考えられる。

われわれはこれまでポリマーフィルムどうしの摩擦帶電の温度、摩擦速度依存性について調べ、ポリマー主鎖セグメントが熱運動により表面ににじみ出て相手物質の表面に存在する分子と接触することが摩擦帶電の素過程であると考えた<sup>1,2)</sup>。摩擦帶電に対する分子運動の寄与をさらに確かめるためには、摩擦時の帶電挙動ばかりではなく、摩擦後の物質中の電荷の挙動を調べることも重要

\* 信州大学繊維学部繊維機械学科 (386 上田市常田 3-15-1)  
Department of Mechanical Engineering, Faculty  
of Textile Science and Technology, Shinshu  
University, 3-15-1, Tokida, Ueda 386, Japan

である。摩擦帶電が2物質間の摩擦という力学過程で生ずる静電気現象であることを考えれば、摩擦帶電が接線力(摩擦力)による表面での破壊(分子の切断)や表面あるいはバルクでの局所的歪(分子配向をともなう)などにより大きな影響をうけると思われる<sup>3)</sup>。

この報告では諸条件下で摩擦したポリマー・フィルムの熱刺激電流(TSC)を測定し、摩擦過程でのフィルム表面、バルクの状態変化と電荷の挙動の関係、表面電荷のフィルム内部への侵入と分子セグメントの熱運動との関係などについて定性的な考察を行ない、摩擦帶電のメカニズムを考えるうえでの一資料を得た。

## 2. 実験方法

図1にポリマー・フィルムの摩擦装置およびTSC測定装置の概略を示した。両装置とも温度制御槽に入れてある。摩擦装置にはフィルムの同一場所を簡単に多回摩擦できるベルト摩擦機構<sup>4)</sup>を採用した。すなわち、直径50 mm、長さ60 mmのステンレススチール製のローラにポリマー・フィルム(ベース)を巻きつけ固定し、その上に試料ポリマー・フィルム(ベルト30×130 mm)を接触角90°でかけ、ベルトの一端をロードセルに、他端を荷重Wに接続する。ローラをモータで矢印の方向に回転させ(円周速度21 mm/s)、ベルト、ベース間で摩擦を行ない、ベルト・フィルム中に生ずる張力を記録し摩擦力を算出する。一定荷重下、所定温度で所定回数(ローラのn回転を摩擦回数nとする)摩擦したベルト・フィルムの摩擦部分(実験によっては非摩擦部分)を直径22 mmの円形に切り取り、表面電荷を除去するためにエチアルコール中に浸漬した(5秒間)。残留アルコールを乾燥後、切り取ったフィルムを摩擦面が電流計の入力側に向くように直径20 mmの銅電極にはさむ。試料にはマイクロメータヘッドの回転とリン青銅板ばねとにより一定荷重を再現よく加えることができる。次いで試料温度を6°C/minで等速昇温させ、TSCをピコアンメータ(タ

ケダ理研 TR-8641)を通して温度とともに記録した。測定温度範囲は20~180°Cである。

すべての実験でベースに市販ナイロン6フィルム(東洋レーヨン)を、ベルトにポリスチレンフィルム(三菱樹脂)を使用した。フィルム厚はともに30 μmである。試料ポリスチレンはガラス転移温度(DTA法で99°C)直下の95°Cで1時間熱処理したものを使用した。ナイロン6とポリスチレンを摩擦するとポリスチレンが負に帯電する。摩擦は30°Cと97°Cの温度条件で行ない、摩擦後のフィルムをアルミ箔でつつみフィルム面をショート状態で保存した。

比較のために同種フィルムに98°Cで直流電圧をかけて分極したもの、研磨紙で表面破壊を行なったものについてもTSCを測定した。

## 3. 実験結果

### 3.1 30°C 摩擦フィルムのTSC

30°C、W=490 mNで摩擦したポリスチレンフィルムのTSCを、nをパラメータとして図2に示した。この場合、ナイロン6フィルムとポリスチレンフィルム間の摩擦力は円周に沿って570 mNであった。

曲線aで示した非摩擦試料(n=0)では102、120および173°Cに正のピークを示した。しかし、これら電流値は小さく、これらはあらかじめ150°Cで熱処理すると消える。本来は完全に残留電荷のない状態を基準に摩擦処理をほどこすべきであるが、150°Cで熱処理するとフィルムの収縮、軟化のため表面性状が悪化し、均質な摩擦が不可能となる。そこで多少残留電荷が存在しても95°C処理のものを試料とした。

摩擦試料のTSCの電流値は非摩擦試料のそれより大きい。TSC曲線はnの増加とともに複雑に変化するが、大別して室温から約140°Cの部分と140°C以上の部分からなる。後者の温度域では試料が軟化した状態である。これらのTSCは試料の軟化とともに流れれるイオン電流と考えられ、摩擦の影響は少ない。したがってこの報告の考察の対象にはしない。

摩擦の効果は140°C以下に現われるTSCに大きく寄与する。各摩擦回数でのTSCのピーク温度と電流方向の符号を表1にまとめた。図2と表1から以下のことがわかる。

- (1) 摩擦試料では非摩擦試料ではない92°C附近に肩が出現する。
- (2) 100~115°Cのあいだに大きなピーク(αピーク)が現われる。nが大きくなるとαピークの温度が高温側へ移行し、複雑にスプリットする。
- (3) 120°C附近にもピークが現われるが、その電流値

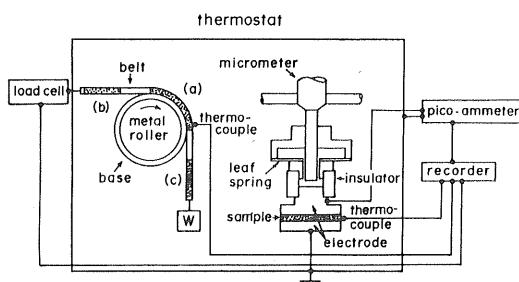


図1 摩擦装置(左)および測定装置(右)

Fig. 1 Friction apparatus (left) and measuring device (right).

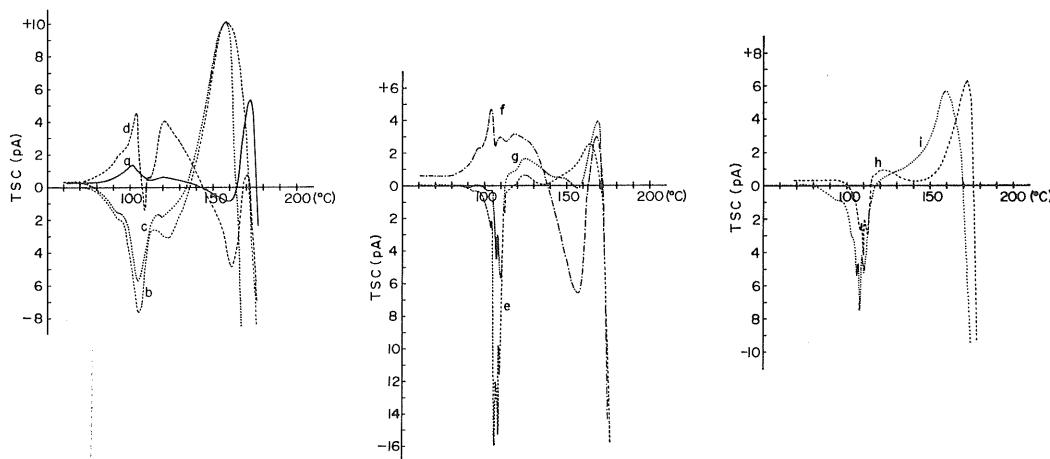


図 2  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $W=490 \text{ mN}$  で摩擦したポリスチレンフィルムの TSC  
摩擦回数 ( $n$ ), a : 0, b : 50, c : 100, d : 150, e : 200, f : 250, g : 300, h : 350, i : 400.

Fig. 2 TSC of polystyrene films rubbed at  $30^{\circ}\text{C}$  under  $W=490 \text{ mN}$ .  
Rubbing numbers ( $n$ ), a : 0, b : 50, c : 100, d : 150, e : 200, f : 250, g : 300, h : 350, i : 400.

表 1  $30^{\circ}\text{C}$  摩擦フィルムの TSC のピーク温度と符号

Table 1 Peak temperatures and signs of TSC for polystyrene films rubbed at  $30^{\circ}\text{C}$ .

Rubbing numbers	(Sign of TSC)		Peak temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )											
0	(+)	102*	(+)	120	(-)	160	(+)	173						
50	(-)	90	(-)	106*			(-)	124	(+)	158				
100	(-)	90	(-)	105*			(-)	120	(+)	158				
150	(+)	92	(+)	104*	(-)	109, (+)	113	(+)	121	(-)	161	(+)	170	
200	(-)	92	(-)	104, (-)	106*, (-)	108, (-)	109, (-)	112	(+)	123	(+)	164		
250	(+)	96	(+)	104*			(+)	110	(+)	118	(-)	157	(+)	168
300	(-)	93	(-)	102	(-)	108, (-)	110*		(+)	124	(-)	157	(+)	169
350					(-)	108, (-)	110*, (-)	113	(-)	121			(+)	172
400	(-)	94	(-)	103	(-)	106, (-)	108*, (-)	110	(+)	123	(+)	159		

\*  $\alpha$  peak temperature

は比較的小さい。

(4) これらのピークの符号は一定ではないが、 $30^{\circ}\text{C}$  摩擦の場合、負の TSC を示すことが多い。

(5)  $n$  とピーク電流とのあいだには定量的関係は見いだされない。

### 3.2 $97^{\circ}\text{C}$ 摩擦フィルムの TSC

$97^{\circ}\text{C}$ ,  $W=294 \text{ mN}$  で摩擦したポリスチレンフィルムの TSC を図 3 に示し、そのピーク温度および符号を表 2 にまとめた。この場合ベース、ベルト間の摩擦力は  $550 \text{ mN}$  であった。 $30^{\circ}\text{C}$  摩擦の場合と同様に、TSC を  $140^{\circ}\text{C}$  以下の部分とそれ以上の部分に分けて考える。後者の温度域では摩擦の効果はみられない。 $140^{\circ}\text{C}$  以下の温度域については以下のことが明らかである。

- (1)  $30^{\circ}\text{C}$  摩擦にみられる  $92^{\circ}\text{C}$  付近の肩はない。
- (2)  $102\sim120^{\circ}\text{C}$  のあいだに複雑な微細構造を有する大きなピーク ( $\alpha$  ピーク) が出現し、ピーク温度は  $n$  が大きくなるにつれて高温側に移行する。

(3)  $120^{\circ}\text{C}$  付近にもピークが現われるが、その電流値は  $\alpha$  ピークのそれに比べて小さい。

(4) これらのピークの符号は一定ではないが、 $97^{\circ}\text{C}$  摩擦の場合、正の TSC を示すことが多い。

(5)  $n$  とピーク電流値のあいだには定量的関係は見いだされない。

## 4. 実験結果の解釈

### 4.1 $\alpha$ ピークに対する摩擦の影響

$30^{\circ}\text{C}$  摩擦においても  $97^{\circ}\text{C}$  摩擦においても、摩擦後試料の TSC は非摩擦試料のそれに比べてピーク電流の絶対値が大きく、TSC 曲線の形は複雑である。

Ong らはポリ塩化ビニルフィルムを摩擦し、フィルム表面にホモ電荷を与えた、非接触法でその TSC を測定した結果、試料のガラス転移温度付近に電流の極大があり、これはホモ電荷が作る内部電場のなかで双極子が配向することによると解釈した<sup>5)</sup>。この現象のなかにはガラス

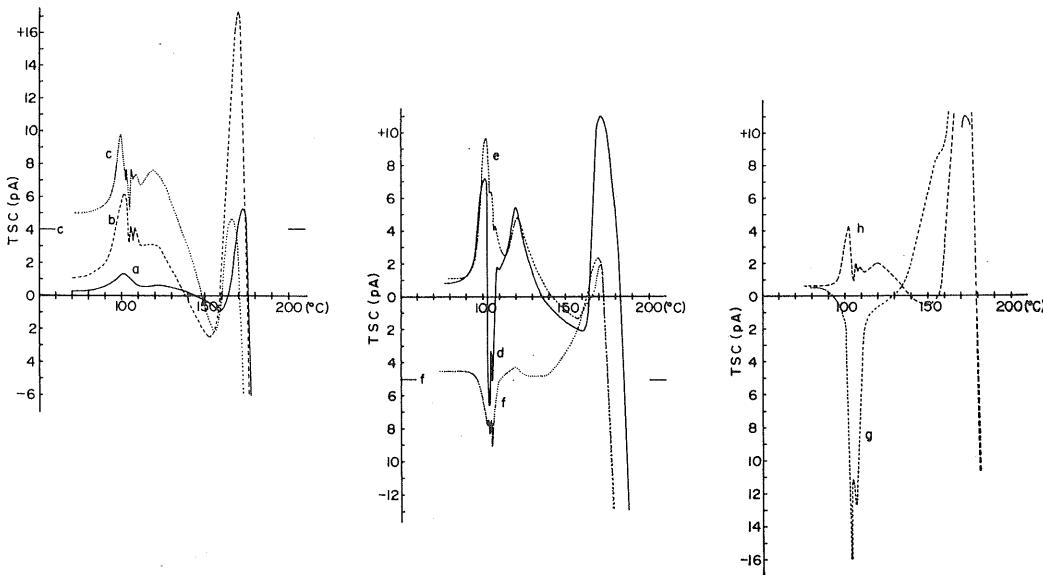


図 3  $97^{\circ}\text{C}$ ,  $W=294\text{ mN}$  で摩擦したポリスチレンフィルムの TSC (c, f の横軸は移動してある)  
摩擦回数 ( $n$ ), a : 0, b : 50, c : 100, d : 150, e : 200, f : 250, g : 350, h : 400

Fig. 3 TSC of polystyrene films rubbed at  $97^{\circ}\text{C}$  under  $W=294\text{ mN}$  (Abscissa is shifted for curves c and f).  
Rubbing numbers ( $n$ ), a : 0, b : 50, c : 100, d : 150, e : 200, f : 250, g : 350, h : 400.

転移温度付近でポリマー主鎖セグメントの熱運動が活発になり、双極子の配向が容易になるという事実がふくまれている。高松らはポリスチレンフィルムに電圧を印加して作ったエレクトレットの脱分極電流を測定し、加圧成膜試料では  $105\sim109^{\circ}\text{C}$  に、トルエン溶液からの成膜試料では  $126\sim136^{\circ}\text{C}$  に脱分極電流のピークを見いだし、これらはポリスチレンの粘弾性的性質の  $\alpha$  分散に相当するとしている<sup>6)</sup>。またポリスチレンのような極性基をもたないポリマーの TSC の原因は、主として微視的に移動してトラップされたイオンの熱的解放によると説明されている<sup>7)</sup>。

非摩擦試料では  $102$  および  $120^{\circ}\text{C}$  に TSC の小さいピークが観察された。これらは成膜時に注入された電荷が熱処理後も残留していることを示す。比較のため  $98^{\circ}\text{C}$ 、電界強度  $56\text{ kV/cm}$  で 1 時間分極したポリスチレンフィルムの TSC を測定し(図 4 曲線 d)，さらにこれを  $150^{\circ}\text{C}$  で 30 分熱処理し、上記とまったく同一条件で電圧を印加したフィルムの TSC を測定した(図 4 曲線 b)。その結果、後者のフィルムでは  $102^{\circ}\text{C}$  にピークが出現するが、 $115^{\circ}\text{C}$  のピークは消失した。これらのことと、試料のガラス転移温度が  $99^{\circ}\text{C}$  であること、 $110\text{ Hz}$  で測定した損失弾性率が  $118^{\circ}\text{C}$  で極大になる(すなわち  $\alpha$  分散)こと<sup>1)</sup>などから、 $102^{\circ}\text{C}$  付近のピークはポリスチレンのガラス転移あるいは  $\alpha$  分散に相当していると考え

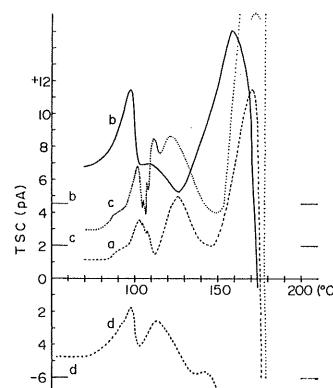


図 4 研磨紙による表面破壊後および電圧印加後のポリスチレンフィルムの TSC (b, c, d の横軸は移動してある)  
a : 研磨紙で 50 回摩擦, c : 研磨紙で 100 回摩擦, b : a および c の測定後,  $56\text{ kV/cm}$  の電界強度,  $98^{\circ}\text{C}$  で分極して得た試料の TSC および d の測定後, 同様に分極して得た試料の TSC, d : 初回フィルムに  $98^{\circ}\text{C}$ ,  $56\text{ kV/cm}$  の条件で分極したあとの TSC

Fig. 4 TSC of polystyrene films after the surface destruction by an abrasive paper and after applying DC voltage (Abscissa is shifted for curves b, c and d).  
a : 50 rubbings with 400 SiC paper, c : 100 rubbings,  
b : TSC of samples obtained by applying the voltage of  $56\text{ kV/cm}$  at  $98^{\circ}\text{C}$  after the measurements of TSC of a, c and d, d : TSC of virgin film applied  $56\text{ kV/cm}$  of voltage at  $98^{\circ}\text{C}$ .

表 2 97°C 摩擦フィルムの TSC のピーク温度と符号  
Table 2 Peak temperatures and signs of TSC for polystyrene films rubbed at 97°C.

Rubbing numbers	(Sign of TSC)	Peak temperature (°C)
0	(+) <sup>*</sup> 102*	(+) <sup>*</sup> 120
50	(+) <sup>*</sup> 102*	(+) <sup>*</sup> 118
100	(+) <sup>*</sup> 100*	(+) <sup>*</sup> 119
150	(+) <sup>*</sup> 102*	(+) <sup>*</sup> 121
200	(+) <sup>*</sup> 102*	(+) <sup>*</sup> 120
250	(-) <sup>*</sup> 103	(+) <sup>*</sup> 120
300	—	—
350	(-) <sup>*</sup> 104*	(+) <sup>*</sup> 159
400	(+) <sup>*</sup> 103*	(+) <sup>*</sup> 120
		(-) <sup>*</sup> 150
		(+) <sup>*</sup> 173

\*  $\alpha$  peak temperature

られる。すなわちポリスチレン主鎖セグメントのミクロブラウン運動の開始によりトラップされているイオンが解放され電流を生ずると考えられる。また 115°C のピークは熱処理により消失することから、ロール成膜試料中に生成する内部歪による多くの欠陥にトラップされた電荷の解放に起因すると考えられる。一般にこのピーク電流値は 102°C に現われるそれよりも小さい。

摩擦により生ずる表面およびフィルム内部の変化は次のようなものが考えられる<sup>3)</sup>。

- (1) 分子鎖の切断 (分子末端の生成)
- (2) 切断分子のセグメント (末端をふくむ) の接線力方向への配向、および切断分子の変形による内部歪の発生または既存歪の緩和
- (3) 非切断分子セグメントの接線力方向への配向
- (4) 非切断分子の変形による内部歪の発生

前 2 者は主として表面で、後 2 者はフィルム内部で生ずると考えられる。岡島らは無定形ポリマーであるポリカーボネートフィルムの延伸倍率が高くなるほどセグメント運動の始まる温度域が高温側に移行することを述べている<sup>8)</sup>が、もし摩擦過程で(3)あるいは(4)の変化が生ずるならば、ガラス転移あるいは  $\alpha$  緩和に関連して TSC のピーク温度は、 $n$  とともに高温側へ移行するであろう。実際に表 1 および表 2 からわかるように  $\alpha$  ピークは  $n$  とともに高温側に移行している。この傾向は 1 枚の試料フィルムについて(a)摩擦部分、(b)ロードセル側の非摩擦部分、および(c)荷重側の非摩擦部分 (図 1 左) の TSC の  $\alpha$  ピーク温度を比較すればより明確である (表 3)。すなわち、30°C 摩擦でも 97°C 摩擦でも  $\alpha$  ピーク温度は非摩擦部分のそれに比して高く、摩擦による電荷蓄積過程に(3)あるいは(4)の機構が関与していることを示している。

ポリスチレンの TSC はそのメカニズムとして、分子鎖セグメントのミクロブラウン運動の開始により、微視的に移動してトラップされている電荷が内部電場の駆動

表 3 摩擦部分 (a), ロードセル側非摩擦部分 (b), 荷重側非摩擦部分 (c) の TSC の  $\alpha$  ピーク温度

Table 3  $\alpha$  peak temperature of TSC for films at rubbed part (a), load cell side part (b) and load side part (c) of a belt.

Rubbing numbers	$\alpha$ peak temperature of TSC (°C)		
	(a)	(b)	(c)
Films rubbed at 30°C	100	105	99
	300	110	98
	400	108	98
Films rubbed at 97°C	50	102	100
	250	103	102
	350	104	99
	400	103	100
			97

表 4  $\alpha$  ピークに対する活性化エネルギー

Table 4 Activation energy for  $\alpha$  peak.

Rubbing numbers	Activation energy (kJ/mol)	
	Films rubbed at 30°C	Films rubbed at 97°C
50	202	139
100	252	252
150	130	193
200	328	458
250	109	307
300	—	—
350	336	487
400	256	454

により移動するということを仮定すると説明でき、この仮定から Perlman の方法<sup>9)</sup>で電荷移動に対する見掛けの活性化エネルギーを求め、その値を表 4 に示した。これらの活性化エネルギーの値はポリスチレンの力学的、誘電的  $\alpha$  緩和に対するその値 (それぞれ 377 kJ/mol<sup>10)</sup>, 331 kJ/mol<sup>11)</sup>) にはほぼ等しく、120°C 以下のピークの出現はポリマー主鎖セグメントの熱運動に関係していると結論できる。表 4 からわかるように  $n$  の増加とともに活性化エネルギーも増大しており、接線力 (摩擦力) により分子鎖セグメントの配向がおき、分子間の相対的運動が

困難になっていると推察される。

#### 4.2 TSC の微細構造について

120°C 以下の  $\alpha$  ピーク以外のピークについては前記(1)または(2)のメカニズムが関係し、ポリマー表面層の問題と考えられる。比較のため室温で 400 番 SiC 研磨紙により 50 および 100 回摩擦(意図的な表面破壊)したポリスチレンフィルムの TSC を測定した(図4 曲線 a および c)。n が大きくなると TSC 曲線の形は複雑になり、92°C 付近に肩が存在する。また 102~120°C 間の TSC の微細構造はナイロン 6 で摩擦したポリスチレンのそれと類似している。研磨紙摩擦フィルムの TSC を測定(180°C まで昇温)したあと、試料温度を 102°C に保ち、電界強度 56 kV/cm で 1 時間分極し TSC を測定すると図4 曲線 b のように 97.5°C に正のピークが現われ、92°C 付近の肩もふくめて微細構造が消失した(電圧印加後測定し、再び電圧印加したフィルムの TSC(4.1 参照)とまったく同じ)。この微細構造は  $\alpha$  ピークよりも高温側に現われる場合が多い。

これらのことからナイロン 6 摩擦ポリスチレンフィルムの TSC で 92°C 付近の肩および 102~120°C に現われる微細構造は、表面層の分子切断が生じ、摩擦により配向しやすくなることと、表面層中に局所的歪が生じ新しい電荷トラップが発生するために生じたものと考えられる。97°C 摩擦試料で 92°C 付近の肩が見いだされないのは、分子切断による内部歪の生成と歪緩和の速度がほぼ等しくなったためと考えられる。参考のために摩擦試料と非摩擦試料との赤外吸収スペクトルを比較したが摩擦による変化は見いだされなかった。

#### 4.3 TSC の符号と摩擦界面での分子運動

表1 および 2 から 30°C 摩擦では負の TSC が、97°C 摩擦では正の TSC が現わることが比較的多い。図4 曲線 d に示したようにピコアンペータの入力側を正にして電圧を印加したフィルムの TSC の符号は、着目した温度範囲で正である。したがって 97°C 摩擦フィルム内部での分極され方、電荷の分布などは上記の方法で得られた電圧印加フィルムのそれと同様であると考えられる。ポリスチレンは分子鎖中に極性基をもたないので、電圧印加による分極の原因はおもにイオンが微視的に移動しトラップされるというメカニズムであろう(低電圧印加フィルムの TSC との類似性から図4 曲線 d の 56 kV/cm で分極したフィルムではホモ電荷の形成は考えなくてもよいだろう)。したがってこの実験の電圧印加フィルムではピコアンペータ側の表面層に負の電荷が多く存在するものと考えられる。97°C 摩擦フィルムの表面層にも負の電荷が多くトラップされ、30°C 摩擦フィルムの場合には逆に正の電荷が多く存在していると推察される。

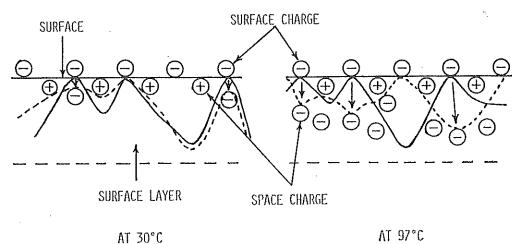


図 5 表面層での分子運動と表面電荷の移動の模式図

Fig. 5 Schematic expression of molecular motion of polymer segments in surface layer and migration of surface charge.

ポリスチレンが無定形ポリマーであることを考えると、ガラス転移温度付近で摩擦した試料とガラス転移温度より十分低い温度で摩擦した試料との TSC の符号の差には摩擦過程で生ずる表面層でのポリスチレン分子の熱運動の差が大きく寄与しているものと考えられる。図 5 に定性的に示したように、ポリスチレンのガラス転移温度より十分に低い低温摩擦では表面層でのポリマー主鎖セグメントのミクロブラウン運動が凍結されているため、摩擦によりポリスチレン表面に発生した電荷(負電荷)は内部に取りこまれることは少ない。したがって、この実験のように TSC 測定の前にフィルムをアルコール洗浄し表面残留電荷を除去した場合、表面層には測定まで存在している表面電荷の影響でそれとは反対符号の電荷(この場合には正電荷)が残り TSC に寄与する。

ガラス転移温度直下の 97°C 摩擦ではフィルム内部および表面層中の分子運動が活発になり、分子セグメントが表面にじみ出て相手表面に存在する相手分子に接触する機会が大きくなるとともに、摩擦過程で表面に発生した(負)電荷がポリマーセグメントの熱運動によるポリマー分子自体の内部への移動(とくに分子末端がトラップとしての性質をもつならば)あるいはイオンなどの電荷担体の内部への拡散により表面層中に運ばれ、アルコール洗浄により表面負電荷を取り去っても表面層には負電荷が多く存在し、電圧印加フィルムと同様な空間電荷を形成していると推察される。したがって測定される TSC の符号は 30°C 摩擦と 97°C 摩擦とでは異なる。Lowell<sup>12)</sup> は金属とポリマーの接触帶電のメカニズムとしてポリマーの力学的変形により電荷のトラップとしての分子末端が試料内部に押し込まれ、新しい末端が表面に現われ電子を受け取るというメカニズムを考えている。実際の摩擦帶電では力学的効果と熱運動の効果の両方を考慮せねばならないだろうが、この実験から得られた結果からは分子鎖セグメントの熱運動の効果のほうが大きいようと思われる。

## 5. おわりに

すでに述べたようにポリマーどうしの摩擦帶電の温度、摩擦速度依存性において、試料ポリマーに特有の温度、摩擦速度で帶電電荷は極大をとり、摩擦界面でのポリマーセグメントの熱運動がこの現象に大きく寄与していることがわかった<sup>2)</sup>。ポリマーと金属間の摩擦帶電の温度、摩擦速度依存性でも同様の結果が得られた<sup>13)</sup>。この報告ではボリスチレンのガラス転移温度付近およびそれより十分低い温度で摩擦したフィルムのTSCの符号の差異から摩擦過程における摩擦界面でのポリマーセグメントの熱運動の重要性を述べた。TSCに現われる表面層の歪の生成過程も摩擦帶電に影響するだろう。これまで多くの実験、理論ではこのような問題はあまり考慮されていなかった。摩擦帶電の本質が2物質間の接触界面を通しての電荷移動であることには異論はないが、2物質間の接触、電荷の表面から表面層あるいはさらに内部への侵入などに対しては分子運動の寄与が大きいと考える。このような問題についての定量的な解釈はこれから課題であろう。

なおこの実験での装置は市川修、伝田博、北端貢、宮崎薰君らにより作製された。また大部分の実験は松野松

江さんにより行なわれた。これらの方々に厚くお礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) K. Ohara: J. Appl. Polym. Sci., 21 (1977), 1409.
- 2) K. Ohara: J. Electrostatics, 2 (1976/1977), 277, 4 (1978), 233.
- 3) K. Ohara: WEAR, 48 (1978), 409.
- 4) 日本機械学会編: 機械工学便覧, pp. 3-37, 日本機械学会 (1968).
- 5) P.H. Ong and J. van Turnhout: Proc. 2nd Int. Conf. on Static Electricity, Frankfurt, April (1973), publ. as Dechema Monogr., No. 72, pp. 105-124.
- 6) 高松俊昭、深田栄一: 理研報告, 46 (1970), 47.
- 7) 高松俊昭: 静電気学会誌, 1, 3 (1977), 166.
- 8) 伊藤栄子、品川幸雄、岡島三郎、沢村貴和、斎藤省吾: 第20回高分子討論会講演予稿集, p. 711 (1971).
- 9) M.M. Perlman: J. Appl. Phys., 42 (1971), 2645.
- 10) J.D. Ferry (H.A. Stuart Ed.): Die Physik der Hochpolymeren, Vol. 4, p. 392, Springer (1956).
- 11) O. Broen and F.H. Muller: Kolloid-Z., 140 (1955), 121.
- 12) J. Lowell: J. Phys. D: Appl. Phys., 9 (1976), 1571.
- 13) K. Ohara: Extended Abstracts, p. 36, 1978 International Workshop on Electric Charges in Dielectrics, Kyoto (1978).