



Title	パラフェニレンジイソシアネート系ポリウレタンの構造と物性及びその応用
Author(s)	笠崎, 敏明
Citation	(2003-03-31)
Issue Date	2003-03-31
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10069/6901">http://hdl.handle.net/10069/6901</a>
Right	

This document is downloaded at: 2019-09-23T09:33:56Z

## 第5章 PPD I系ポリウレタンのアクチュエーター への応用

### 5. 1 緒言

機能性高分子材料は、外からの刺激、例えば光、熱、電気、圧力などの種々な刺激が加えられた場合に、その刺激に対して特異的、選択的に応答して作業を行うことができる材料であり、著者らは、以前に、温度刺激により、接着と剥離の両機能が可逆的かつ急激に変化する側鎖結晶性ポリマーを報告している<sup>1, 2)</sup>。

高分子アクチュエーターとは、高分子が、駆動源となる動力システムのことであり、外部の刺激に応答して伸びたり縮んだりする機能性高分子を利用したものである。産業の種々な方面でロボットが用いられているが、これらの運動は殆ど電気エネルギーにより駆動されている。一方、生態系では筋肉に代表されるように化学エネルギーが直接力学エネルギーに効率よく変換され運動が行われている。エネルギーの交換に関しては、熱～機械（内燃機関、摩擦）、電気～機械（モーター、発電機）、光～電気（太陽電池、放電発光）など、多くの技術があるが、これらのシステムの中で確立されていない技術がある。それは、化学エネルギーから機械エネルギーの直接変換である。この変換系は、生体システムでいえば、高等生物が筋肉を通じて行っている仕事であり、バクテリアが運動する際のべん毛や繊毛が果たしている作用である。この変換系の特徴は、他の力学エネルギー変換系に比較して格段に効率が高いことである。例えば、筋肉のエネルギー交換効率は約60%にも達し、通常の熱機関の約5～30%を大きく上回っている。

材料の点で筋肉に近い人工筋肉の研究は高分子ゲルを中心に進められている。高分子ゲルは、古くから研究されているが、約20年前の相転移現象の発見を契機として機能材料への応用が活発である<sup>3)</sup>。高分子ゲルの電場下での挙動は、長田らをはじめ多くの研究者によって広く検討され、さまざまな現象が見いだされている<sup>4~6)</sup>。

このうち、アクチュエーターとしての試みは高分子電解質を用いたゲルに関するものが殆どである。ポリビニルアルコール（PVA）とポリアクリル酸のブレンド物からのゲルはゲルフィンガーやゲルフィッシュとして注目を集めた<sup>7~9)</sup>。これはポリアクリル酸のゲル中でのイオン成分の分布を、直流電場下で非対称に制御することにより、ゲルの変形が誘起されることを利用したものである。高分子電解質ゲルは、比較的大きな変形を伴うが、基本的にpHに依存したゲルの膨潤、収縮挙動であるため応答速度が遅い、駆動制御が困難、発熱、劣化などの問題がある。高分子電解質ゲルとは異なり、PVAゲルの溶媒である水を高極性溶媒のジメチルスルホキシド（DMSO）に置換し、直流電場を印可すると高速で収縮する非イオン性ゲルが平井らによって見いだされている<sup>10, 11)</sup>。この非イオン性ゲルは、双極子モーメントの大きな非イオン性の溶媒を用いるので、電流による発熱が殆どなくなるという優れた特徴を持った事になる。しかしながら、空気中で駆動させる際にはゲルからの溶媒の流出があり問題となる。一方、エラストマーは他の材料には見られない伸縮挙動とエントロピー弾性を有し、エラストマーに生体筋肉と同様に外部刺激に応答して伸縮する機能を付与出来れば、これまでに例を見ない高性能、高出力のアクチュエーターや人工筋肉としての応用が考えられる。これまで著者らが研究を進めてきたポリウレタンは、原料のポリオールを始めとする各種原料の選択の自由度が大きく多種多様な分子設計が出来る材料であり、優れた物性が得られる。また、ポリウレタンは、ソフトセグメントとハードセグメントに相分離した形態を持ち、この構造のそれぞれは、非イオン性高分子ゲルのゲルの微結晶相（PVA）と溶媒の部分（DMSO）に対応すると考えると、無溶媒型のアクチュエーターとしての可能性がある。ここでは、PPDI系ポリウレタンを中心に各種ポリウレタンエラストマーを合成し、ポリウレタンにおける電場応答性とポリウレタンの分子構造との関係を検討した。

## 5. 2 実験

### 5. 2. 1 原料

ポリオールには、ポリエチレングリコール (PEG,  $M_n=1979$ ; 三洋化成工業社製) 70重量部とポリプロピレングリコール (PPG,  $M_n=2007$ ; 三洋化成工業社製) 30重量部のブレンド物、ポリエチレングリコール (PEG,  $M_n=1979$ ; 三洋化成工業社製) 50重量部とエチレンオキシドでキャップされたポリプロピレングリコール (EOPPG,  $M_n=2000$ ; 三洋化成工業社製) 50重量部のブレンド物、ポリエチレングリコール (PEG,  $M_n=2200$ ; 三洋化成工業社製)、エチレンオキシドがキャップされたポリプロピレングリコール (EOPPG,  $M_n=2000$ ; 三洋化成工業社製)、ポリ-3-メチル-1,5-ペンタンアジペートポリオール (PMPA,  $M_n=2945$ あるいは $M_n=1948$ ; クラレ株式会社製)、ポリブチレンアジペートポリオール (PBA,  $M_n=2055$ ; 日本ポリウレタン工業社製)、ポリエチレンアジペートポリオール (PEA,  $M_n=3002$ あるいは $M_n=2022$ ; 日本ポリウレタン工業社製)、ポリカプロラクトンポリオール (PCL,  $M_n=1996$ ; ダイセル化学工業社製)、ポリ $\beta$ -メチル- $\delta$ -バレロラクトンジオール (PMVL,  $M_n=1042$ あるいは $M_n=1510$ ; クラレ株式会社製)の12種類を使用した。イソシアネートには、パラフェニレンジイソシアネート (PPDI)、4,4'-ジフェニルメタンジイソシアネート (MDI)、トリレンジイソシアネート (TDI)を使用した。鎖延長剤には、2,2',3,3'-テトラクロロ-4,4'-ジアミノジフェニルメタン (TCDA)、1,1,1-トリメチロールプロパン (TMP)、1,4-ブタンジオール (1,4-BD)、1,3-ブタンジオール (1,3-BD)、平均分子量が993のポリエチレンアジペートポリオール (PEA1000)を使用した。使用した原料の構造を Table 23に示す。

Table 23 Materials used in the synthesis of the polyurethane formulations.

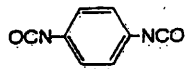
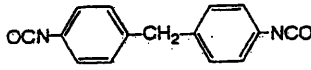
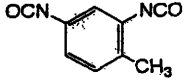
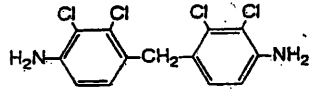
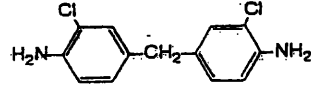
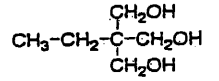
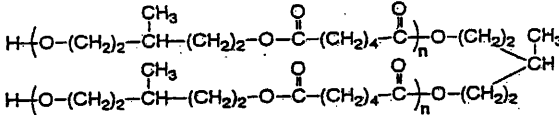
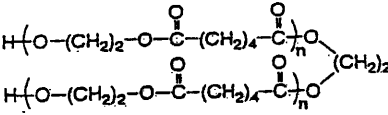
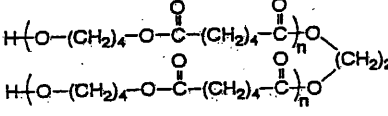
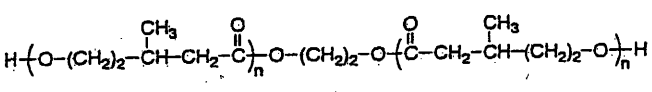
Materials	Abbreviation	Chemical formula	Molecular weight
Paraphenylene diisocyanate	PPDI		160
4,4'-diphenylmethane diisocyanate	MDI		250
Tolyene diisocyanate	TDI		174
2,2'-3,3'-tetrachloro-4,4'-diaminophenylmethane	TC DAM		336
3,3'-dichloro-4,4'-diamino diphenylmethane	MOCA		267
1,1,1-tris(hydroxymethyl) propane	TMP		134
Polyethylene glycol	PEG	$(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_n$	
Polypropylene glycol	PPG	$(\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{O})_n$	
Poly (3-methylpentamethylene adipate) glycol	PMPA		
Polyethylene adipate polyol	PEA		
Polybutylene adipate polyol	PBA		
Polycaprolactone polyol	PCL	$\text{H}-(\text{O}-(\text{CH}_2)_5-\text{C}(=\text{O}))_n-\text{O}-(\text{CH}_2)_2-\text{O}-\text{C}(=\text{O})-(\text{CH}_2)_5-\text{O}-\text{H}$	
Poly ( $\beta$ -methyl- $\delta$ -valerolactone) glycol	PMVL		

Table 24 Compositons of polyurethane elastomers.

Sample No.	Polyol.	Diisocyanate	Chain extender	Molar ratio		$K^a$	$M^b$
				Polyol:Diisocyanate:	Chain extender		
1	PEG2000:PPG2000=7:3	PPDI	TCDAM	4.95:10:4.75		2.02	1.03
2	PEG2000:EO-capped PPG	PPDI	TCDAM	-		-	-
3	PEG2200	PPDI	TMP	-		-	-
4	PEG2200	MDI	TMP	-		-	-
5	EO-capped PPG	TDI	MOCA	-		-	-
6	PMPA3000	MDI	TMP	5.0:10:4.61		2.00	1.04
7	PMPA3000	MDI	PEA1000	5.0:10:3.55		2.00	1.17
8	PMPA2000	PPDI	1.2-PD/1.4-BD	-		-	-
9	PMPA2000	PPDI	1.2-PD	5.01:10:4.10		2.00	1.10
10	PBA2000	PPDI	1.4BD/TMP	4.99:10:0.91:2.29		2.00	1.22
11	PMPA3000	PPDI	1.4PD/TMP	4.98:10:2.04:2.30		2.01	1.07
12	PEA3000	TDI	TMP	-		-	-
13	PEA2000	TDI	TMP	5.01:10:4.07		2.00	1.10
14	PCL2000	PPDI	1.3-BD	5.01:10:4.22		2.00	1.08
15	PCL2000	PPDI	1.3-BD/1.4-BD	5.01:10:3.11:1.11		2.00	1.22
16	PMVL1000	PPDI	1.4-BD	5.0:10:3.33		2.00	1.20
17	PMVL1500	PPDI	1.4BD/TMP	4.98:10:1.25:2.45		2.01	1.15

<sup>a)</sup>  $K = (\text{moles of NCO groups of diisocyanate}) / (\text{moles of OH groups of polymer glycol})$

<sup>b)</sup>  $M = (\text{moles of NCO groupes of diisocyanate}) / (\text{moles of total OH and NH groupes of polymer glycol and diamine})$

### 5. 2. 2 合成

これらの原料を使用し、配合比をイソシアネート：ポリオール＝2：1としてプレポリマー法で合成した。減圧下115℃で2時間脱水乾燥したポリオールを70℃に冷却した後、ジイソシアネートを添加し、85℃で2時間反応させ、イソシアネート末端プレポリマーを合成した。次にこのプレポリマーを減圧下で脱泡した後、鎖伸長剤を加え、攪拌し、あらかじめ110℃に加温しておいた金型に注型し、110℃で10時間硬化させた。合成したポリウレタンの配合をTable 24に示す。

### 5. 2. 3 ポリウレタンの特徴

合成された種々のポリウレタンは、比較的複雑な組成からなるものが多く、これらの組成比と試料番号については、Table 24に示しているが、これらのポリウレタンの特徴を以下に示す。

#### No. 1 PPD I/PEG2000/PPG2000/TCDAM

PEGは、Mnが1000を越えると室温で固化する結晶性のあるポリオールであり、PPGは、側鎖メチル基の導入により、結晶化が阻害され室温では、液状のポリオールである。ソフトセグメントに使用しているポリオールこれらのブレンド物である。TCDAMは、CI基の導入されたバルキーなジアミン系の鎖延長剤である。本研究で述べているように、PPDIのハードセグメントは強い凝集力を持つ。

#### No. 2 PPD I/PEG2000/EOPPG2000/TCDAM

ソフトセグメントは、PEGとEOPPGとのブレンド物であり、No. 1とよく似た特徴であるが、ブレンド比率が異なる。

#### No. 3 PPD I/PEG2200/TMP

ソフトセグメントは、PEGであり、No. 1及びNo. 2と同様にポリエーテル系である。鎖延長剤として、トリオールであるTMPを使用し、凝集力を低下させた。

#### No. 4 MDI/PEG2200/TMP

ジイソシアネートとして、No. 3のPPDIに代わりMDI

を使用した。その他は同じであり、これにより、ハードセグメントの凝集力を低下させた。

No. 5 TDI/EOPPG/MOCA

ソフトセグメントは、ポリエーテル系であるEOPPGを使用した。ハードセグメントは、工業用として汎用であるTDI、MOCAを使用した。

No. 6 MDI/PMPA3000/TMP

No. 3のポリオールをポリエーテル系からポリエステル系に変えた。PMPAは、側鎖にメチル基を持つ結晶性の低いポリエステル系ポリオールである。

No. 7 MDI/PMPA3000/PEA1000

No. 6の鎖延長剤をトリオールであるTMPから高分子量であるポリエステル系ジオールPEA1000に変えた。

No. 8 PPDI/PMPA2000/1,2-PD/1,4-BD

イソシアネートとしてPPDIを使用し、ソフトセグメントはポリエステル系のPMPAである。鎖延長剤は、1,4-BDと側鎖のある短鎖ジオールである1,2-PDの混合物を使用した。

No. 9 PPDI/PMPA2000/1,2-PD

No. 6の鎖延長剤を1,2-PDと1,4-BDのブレンド物から1,2-PDに変えた。側鎖のある短鎖ジオールのみを使用することにより、ハードセグメントの凝集力を低下させた。

No. 10 PPDI/PBA2000/1,4-BD/TMP

ソフトセグメントは、室温で固化する結晶性のあるポリエステル系ポリオールであるPBAを使用した。鎖延長剤の一部にトリオールであるTMPを使用した。

No. 11 PPDI/PMPA3000/1,2-PD/TMP

ソフトセグメントは、結晶性の低いポリエステル系ポリオールであるPMPAを使用した。鎖延長剤は1,2-PDとTMPのブレンド物を使用し、ハードセグメントの凝集力を低下させた。

No. 12 TDI/PMPA3000/TMP

No. 6のイソシアネートをMDIからTDIに変えた。



No. 13 TDI/PEA2000/TMP

No. 12 のポリオールを PMPA から PEA に変えた。ソフトセグメントは、側鎖メチル基を持つ結晶性の低いポリエステル系ポリオールから結晶性の高いポリエステル系ポリオールとした。

No. 14 PPDI/PCL2000/1,3-BD

ソフトセグメントは、結晶性の高いカプロラクトン系ポリオールを使用した。鎖延長剤は、1,3-BD を使用し、ハードセグメントの凝集力を低下させた。

No. 15 PPDI/PCL2000/1,3-BD/1,4-BD

No. 14 の鎖延長剤を 1,3-BD から 1,3-BD と 1,4-BD のブレンド物に変えた。側鎖のある短鎖ジオールに 1,4-BD を加えることにより、ハードセグメントの凝集力を増加させた。

No. 16 PPDI/PMVL1000/1,4-BD

ソフトセグメントは、PMPA と同様に側鎖にメチル基を持つポリエステル系ポリオールである PMVL を使用した。鎖延長剤は、一般的な 1,4-BD を使用した。

No. 17 PPDI/PMVL1500/1,4-BD/TMP

No. 16 のポリオールの分子量を増加させた。鎖延長剤を 1,4-BD から 1,4-BD と TMP のブレンド物に変えることにより、ハードセグメントの凝集力を低下させた。

## 5. 2. 4 試験及び測定

### 1) 電場による駆動

ポリウレタンシートを 20mm×20mm×2mm に切り出し、両側に真鍮電極を装着し、直流安定化電源 (Atto Corporation V-C Stabilizer SJ-1061) でウレタンシートの厚さ方向に直流電圧を印加した。電極の一方には、反射板を置き、この動きをレーザー変位センサー (KEYENCE LB-02) により室温で測定した。直流電場は、最大 1000 V を印加した。装置を Fig. 42 に示す。

### 2) 弾性率

圧縮弾性率を粘弾性測定装置 (MAC science Co TMA 4000) を使

用し室温で測定した。測定条件は、周期 4 S、振幅荷重  $10 \pm 5g$  とした。測定開始から 300 秒間の平均値を弾性率とした。

### 3) 電気容量

ポリウレタンシートを  $20mm \times 20mm \times 2mm$  に切り出し、両側に真鍮電極を装着し、LCR テスタ (HIOKI 3520) で、室温における  $400 Hz \sim 100 kHz$  の電気容量及び損失係数を測定した。測定には 1.0V の電圧を印加した。誘電率は、ポリウレタンシートの面積と厚みの補正を行うため、以下の式より算出した。

$$\epsilon = C d / S \epsilon_0 \quad (\epsilon : \text{誘電率、} \epsilon_0 : \text{真空の誘電率、} \\ C : \text{測定した電気容量、} d : \text{厚み、} S : \text{面積})$$

### 4) 電圧印加電流

ポリウレタンシートを  $20mm \times 20mm \times 2mm$  に切り出し、両側に真鍮電極を装着し、デジタル超高抵抗/微小電流測定装置 (ADVANTEST R8340A) で、電圧印加のもと、電流値の経時変化を測定した。測定は室温、電位差 100V で行った。

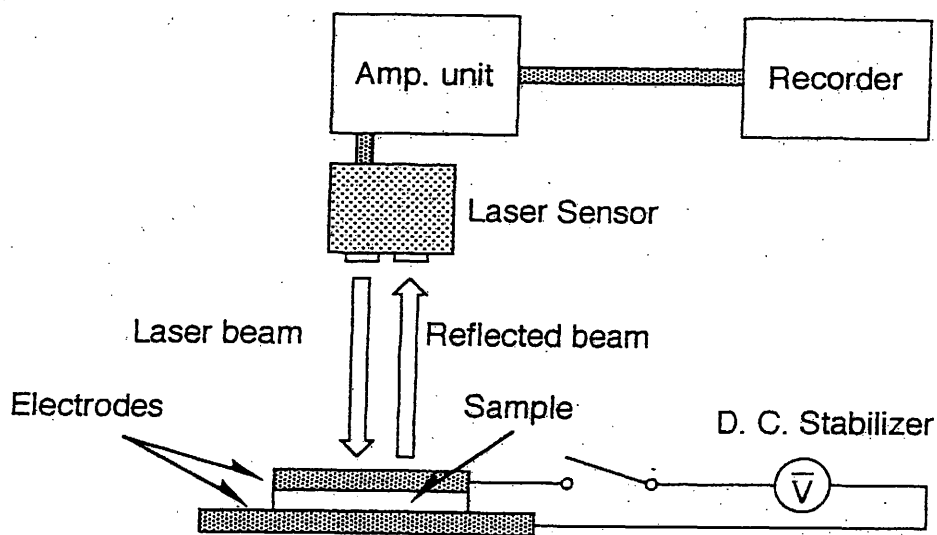


Fig.42 The apparatus for measurement of the strain induced by electric field.

### 5. 3 結果及び考察

#### 5. 3. 1 電場による駆動及び誘電率、発生応力

各種ポリウレタン試料の誘電率、弾性率、収縮率、発生応力を Table 25 に示す。

Table 25 The effect of structure on the polyurethane elastomer properties.

Sample No.	$\epsilon$	Elastic modulus (MPa)	Strain (%) of 400kV/m	Generated stress (kPa)
1	13.9	0.84	0.01	0.0
2	12.3	1.24	0.0	0.0
3	3.1	0.56	0.0	0.0
4	3.3	1.45	0.0	0.0
5	7.7	1.07	0.0	0.0
6	8.0	1.20	0.11	1.3
7	8.1	1.53	0.22	3.3
8	6.4	1.59	0.59	9.4
9	8.4	1.37	0.71	9.7
10	9.1	1.53	0.50	7.7
11	6.6	1.15	1.34	15.4
12	7.7	1.05	0.0	0.0
13	9.7	0.88	0.02	0.2
14	6.9	1.21	0.87	10.5
15	7.8	1.81	0.73	13.2
16	2.6	1.28	0.20	2.4
17	8.6	0.75	0.51	3.8

誘電率では、PEGとPPGとのブレンド物である No. 1 と No. 2 のポリウレタンがかなり大きく、ポリエステル系ポリウレタンの多くは6~10の間であった。

各種ポリウレタン試料に400Vの直流電圧を印加した結果、変位の現れない試料と電場方向に対して収縮を示す試料とが観察された。ポリエーテル系ポリウレタンである No. 1~No. 5 は、ハードセグメント成分であるイソシアネートの違いに関わらず、収縮率が0%かそれに近い値であったが、ポリエステル系及びポリカプロラクトン系ポリウレタンである No. 6~No. 17 では、殆どの系で応答性が見られ、ソフトセグメント成分の違いにより応答性に差が現れた。

次に収縮変位（収縮率）は、ポリウレタンの分子構造に影響されるが、弾性率にも依存すると考えられるため、試料の 400V/mm における収縮率と測定された圧縮弾性率の積から発生応力を算出した。No. 1～No. 5 のポリエーテル系ポリウレタンの発生応力がいずれも 0 であるのに対し、ポリエステル系及びポリカプロラクトン系ポリウレタンの中に発生応力の高いものが見られた。

各種ポリウレタンの発生応力と誘電率の関係を Fig. 43 に示した。ポリエーテル系ポリウレタンは、誘電率に関係なく電場応答性を示さないが、ポリエステル系及びポリカプロラクトン系ポリウレタンに発生応力の大きいものが観察された。

ポリエステル系及びポリカプロラクトン系ポリウレタンで電場応答性を示すものが多いことより、カルボニル基の双極子モーメントが電場応答性に寄与していると考えられる。

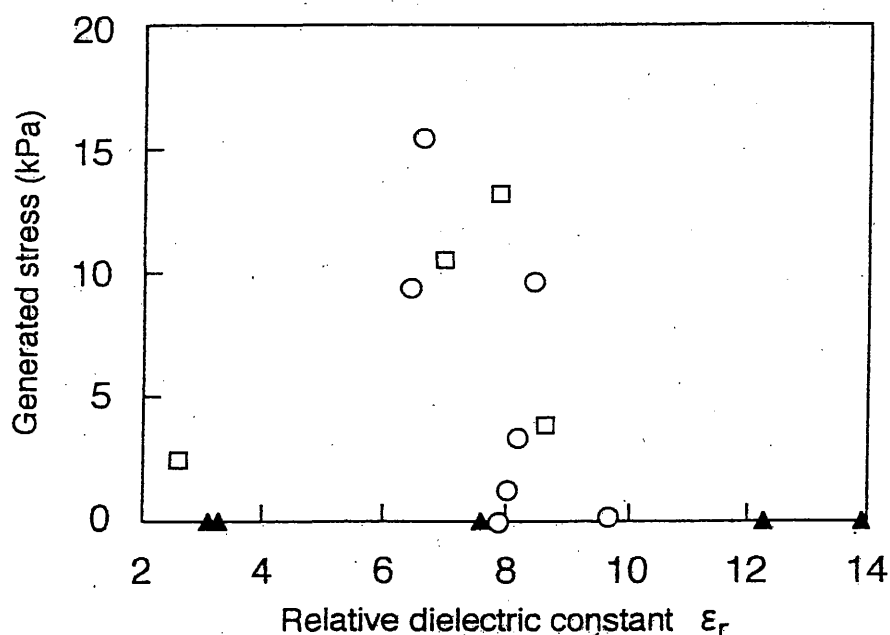


Fig.43 Relation between generated stress and relative dielectric constant.

▲;polyether type, ○;polyester type, □;polylactone type.

### 5. 3. 2 ポリエステル系ポリウレタンの電場による駆動

各種ポリウレタン試料に0~1000Vの直流電圧を印可した結果、応答性の発現の有無が確認された。電場電圧印加方向に対して顕著に収縮変位が観察されたポリエステル系ポリウレタン (No. 14:PPDI/PCL/1, 3BD) の駆動曲線を Fig. 44 に示す。これを見ると、ポリエステル系ポリウレタンは (No. 14)、電圧印加に鋭敏に応答し、約0.5~1秒で平衡に達した。電場を切ると初期の試料厚みに回復した。これらの収縮・回復過程は繰り返しの電圧印加に対しても安定して観測された。

電場の強度に対する収縮率の依存性を Fig. 45 に示した。電場強度は、0~500V/mm まで変化させた。300V/mm 以上の電場強度では駆動が飽和する傾向が観察された。200V/mm までの低電場域で収縮率を電場強度の2次に対してプロットすると Fig. 46 に示すような比例関係が得られた。

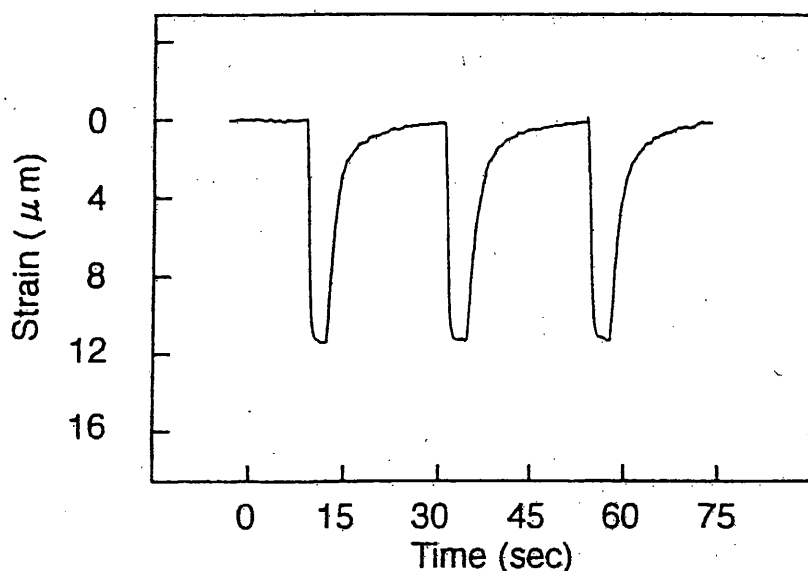


Fig.44 The action of the elastomer induced by electric field.

Sample:No.14

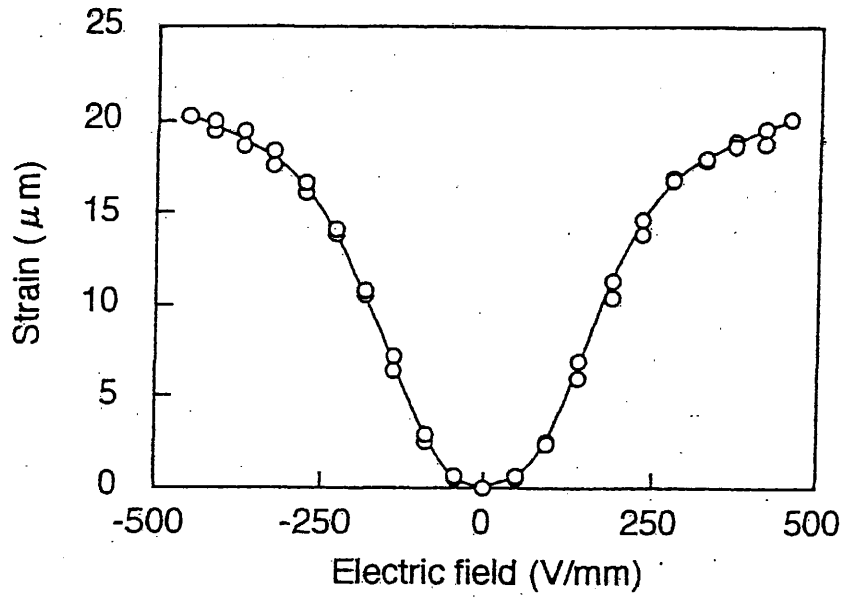


Fig.45 Typical strain of the elastomer induced by electric field.  
Sample:No.14

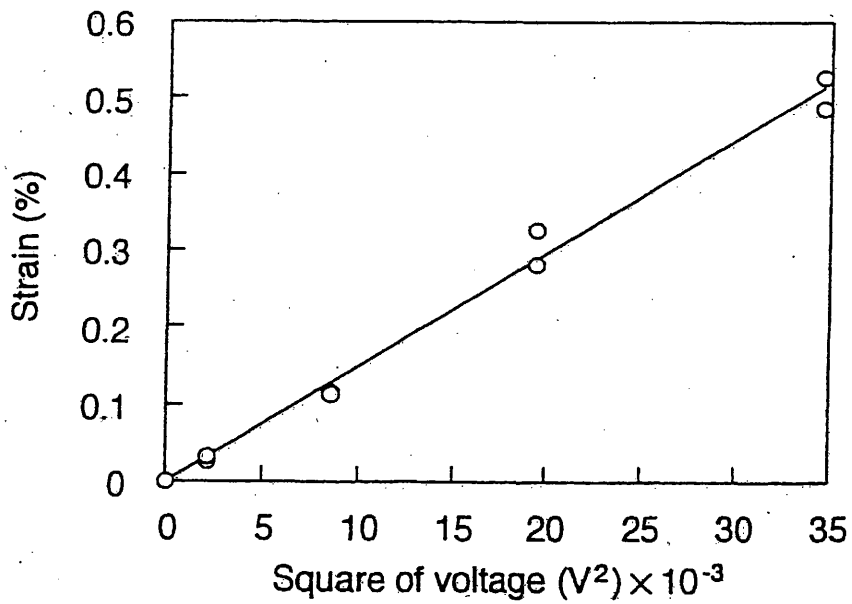


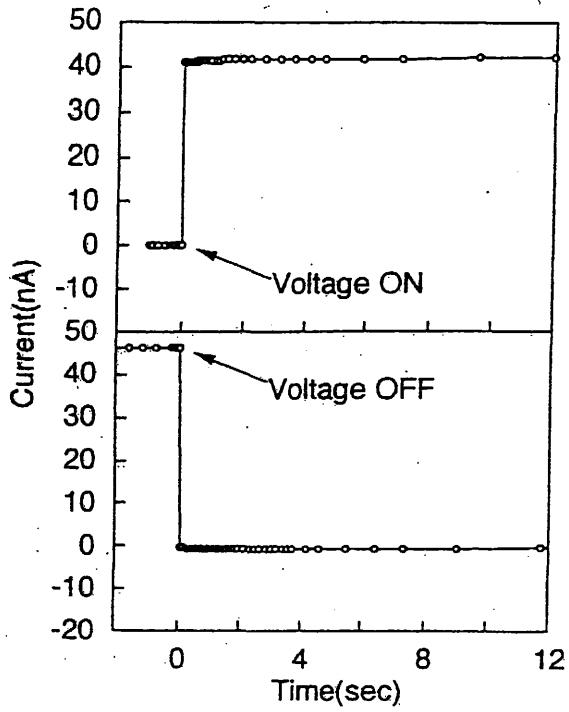
Fig.46 Dependence between square of voltage and strain.  
Sample:No.14

### 5. 3. 3 電圧印加における電流値

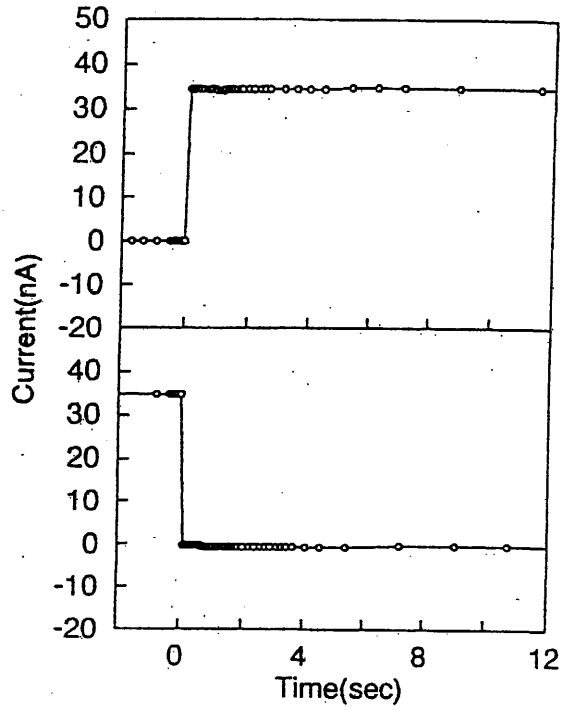
ポリエーテル系ポリウレタン及びポリエステル系ポリウレタンの直流100V印加における電流値を測定し、充放電過程をFig. 47-1, Fig. 47-2に示した。ソフトセグメント成分がPEGから成るポリエーテル系ポリウレタン (No. 3) では、100V印加開始により、約40 nAの電流が流れるが、後に示すポリエステル系ポリウレタンに見られるような充放電電流の経時変化は見られず、荷電し難いことが示された。同じPEG系ポリウレタンであるNo. 4についても電流値が経時的に変化する傾向は見られない。ポリエステル系ポリウレタン (No. 11) では、電圧印加と同時に電流値はピークを示し、190 nA程度の電流が一瞬流れる。ここでは試料への電荷が蓄積されていく過程を示していると考えられる。その後電流値は減少し1秒以内で変化が無くなり約150 nAの暗電流の状態となる。電圧を切ると、試料には逆電流が流れ、1秒以内で電流値は0となる。これは、試料に充電された電荷の放電過程を見ていると考えられる。ソフトセグメント成分がPCLから成るポリエステル系ポリウレタン (No. 14) についても同様な充放電電流の経時変化が見られた。

### 5. 3. 4 駆動曲線と電流値の経時変化

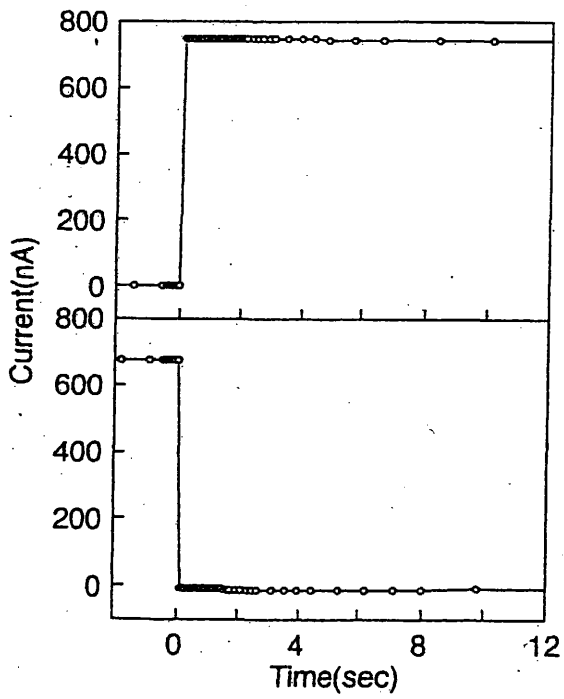
充放電電流変化の大きいポリエステル系ポリウレタン (No. 11, No. 14) は、電場による駆動量が大きく、直流の電気容量と駆動量との間には、交流下の電気容量測定の結果では見られなかった依存関係があると思われる。ソフトセグメントの成分が駆動に影響する要因であると考えられる。ポリエステル系ポリウレタン (No. 11) に関して、駆動曲線と電流値の経時変化の関係を Fig. 48に示した。駆動量の経時変化 (Fig. 48 (a)) と、電流値の経時変化 (Fig. 48 (b)) とをプロットし求めた。ほぼ直線に乗ることよりポリエステル系ポリウレタンの充電の過程と電場による収縮過程に対応関係があることがわかった。



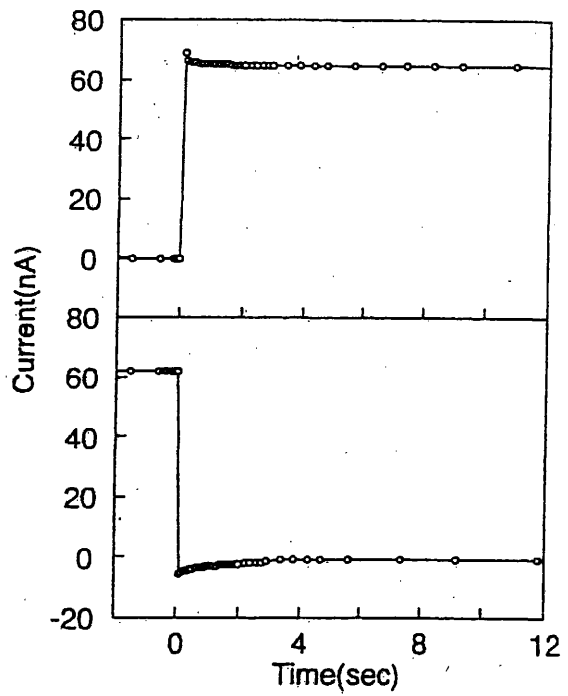
No. 3



No. 4



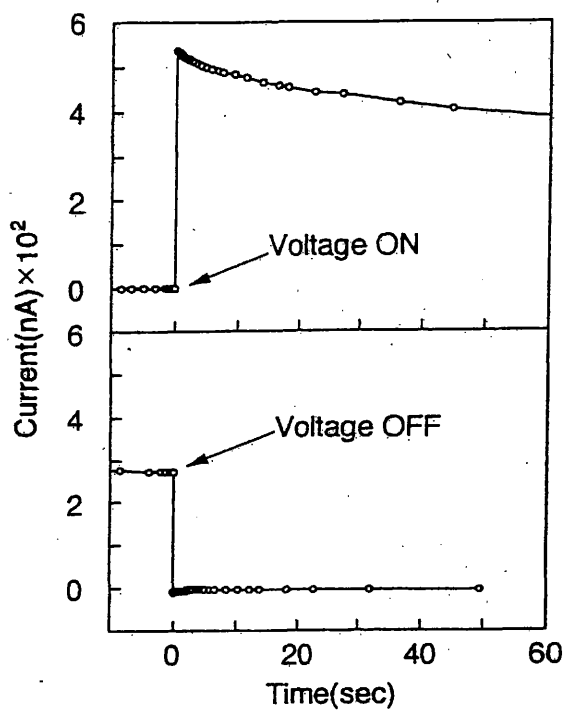
No. 5



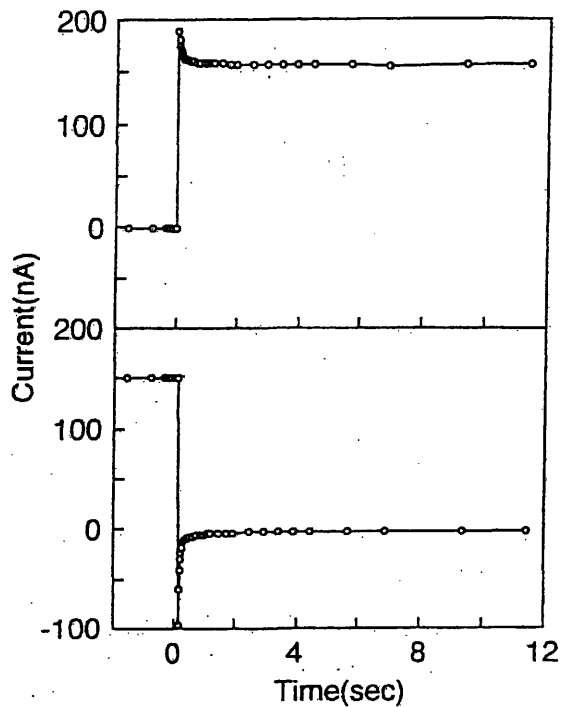
No. 6

Fig.47-1 Charging and discharging process of polyurethane elastomers.

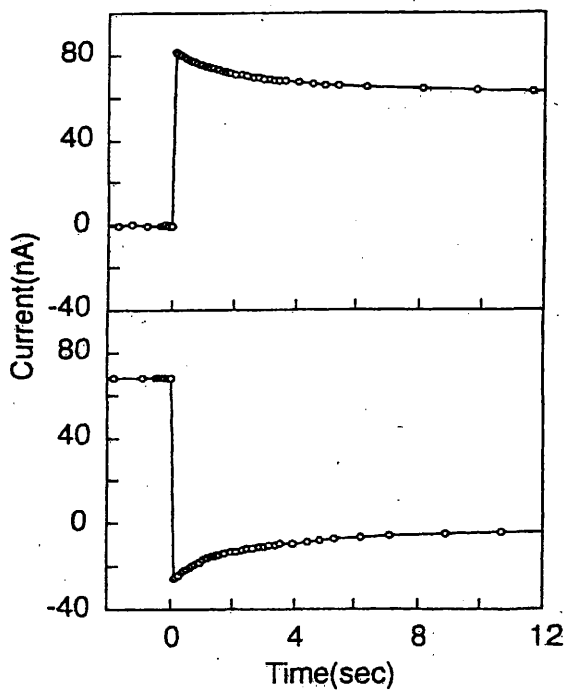




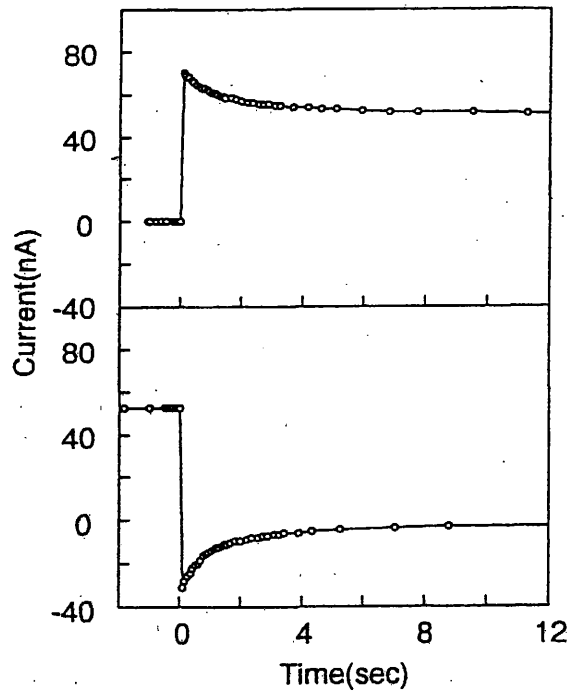
No. 9



No. 11

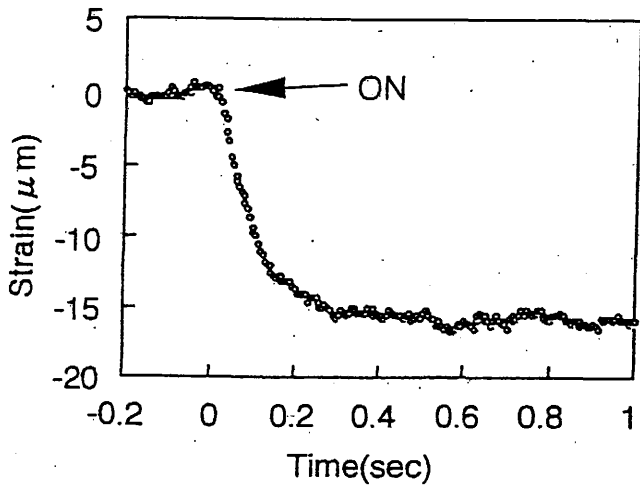


No. 14

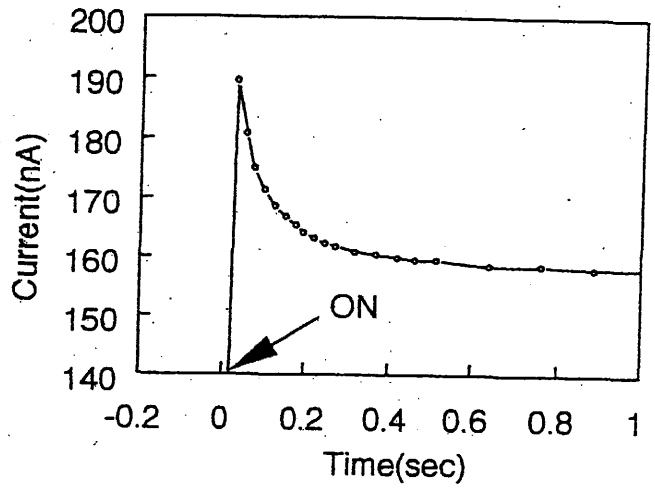


No. 15

Fig.47-2 Charging and discharging process of polyurethane elastomers.



(a) : The actuation of No.11 induced by E. F..



(b) : Charging process of No.11.

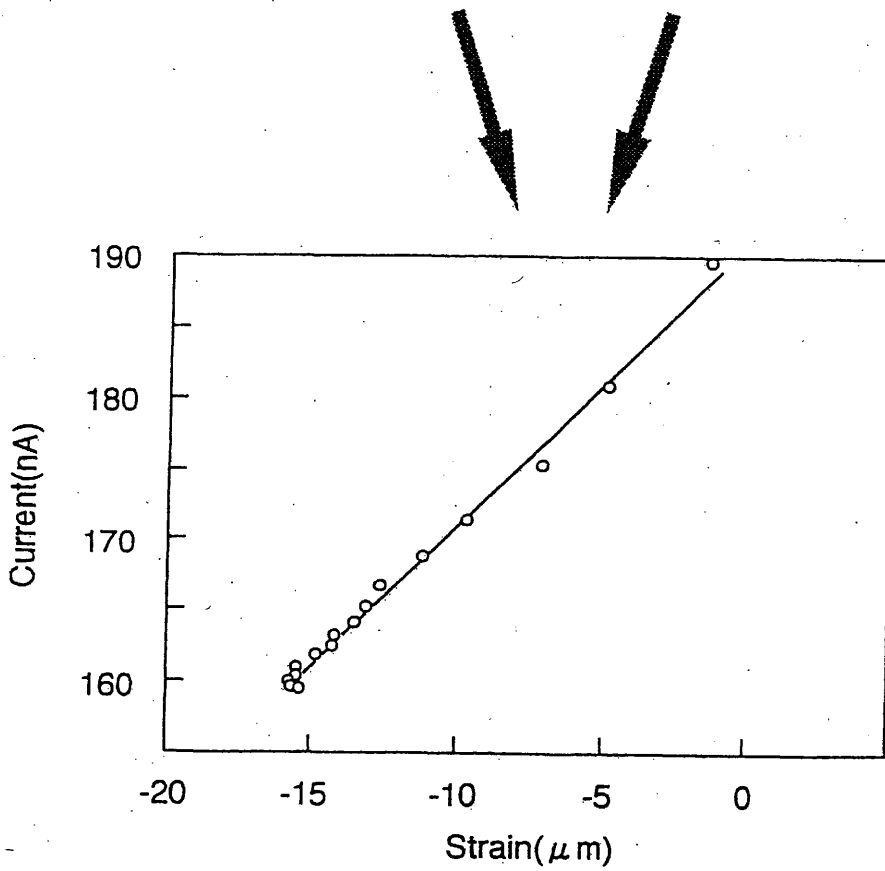


Fig.48 Relation between charge current on the strain by electric field.

## 5. 4 結語

本研究は、ポリウレタンエラストマーの電場応答性とポリウレタンの分子構造との関係を検討した。どのような構造を持つポリウレタンエラストマーが電場に応答するのかを検討するため、各種ポリウレタンを合成し、そのポリウレタンの電場応答性、誘電率測定、電場印可電流測定を行った。その結果以下に示す結論を得た。

- (1) ソフトセグメントにカルボニル基を有するポリエステル系ポリウレタンは、電場に鋭敏に応答し、ポリエーテル系ウレタンは応答性を示さなかった。
- (2) ポリエステル系ポリウレタンは、電圧印加方向に対して、収縮変位が観測され、約1秒で平衡に達し、これらの収縮・回復過程は繰り返しの電圧印加に対しても安定であった。
- (3) 充放電過程では、ポリエーテル系ポリウレタンは、充放電電流の経時変化は見られず、荷電し難いことが示された。ポリエステル系ポリウレタンは、充放電電流の経時変化が見られた。
- (4) ポリエステル系ポリウレタンは、充電過程と収縮過程に対応関係があることがわかった。
- (5) ポリウレタンに電圧印加すると、カルボニル基の双極子が配向し、電荷の蓄積が起こり、これにより収縮駆動を促進すると示唆された。

以上の結果、ポリウレタンが電場により、電場方向に収縮するというこれまでに報告されていない新規な現象であり、本件の現象は、人工筋肉素材への可能性を示唆した。

## 第5章の参考文献

- 1) 笠崎敏明, 犬飼健三. : コンバーティング, **8**, 19(1998)
- 2) 笠崎敏明, 犬飼健三. : ファインケミカル, **6**, 12(2000)
- 3) DeRossi, D., Kajiwara, K., Osada, Y., Yamauchi, A. : *Polymer Gels, Fundamentals and Biomedical Applications*, Plenum Press, New York (1991)
- 4) 入江正浩, 長田義仁, 片山誠二. : メカノケミストリー, 丸善, (1989)
- 5) Osada, Y., Umezawa, K., Yamauchi, A.: *Bull. Chem. Soc. Jpn*, **62**, 3232(1989)
- 6) Osada, Y., Ohnishi, S. : *Macromolecules*, **24**, 3020 (1991)
- 7) 志賀亭, 広瀬美治, 岡田茜, 倉内紀雄. : 高分子論文集, **46**, 709 (1989)
- 8) Shiga, T., Hirose, Y., Okada, A., Kurauchi, T. : *197 th ACS Polymer Preprints*, (1989) 310
- 9) Shiga, T., Kurauchi, T. : *J. Appl. Polymer. Sci*, **39**, 2305 (1990)
- 10) Hirai, T., Nemoto, H., Hirai, M., Hayashi S. : *Journal of Applied Polymer Science*, **53**, 79 (1994)
- 11) Hirai, T., Nemoto, H., Suzuki, T., Hayashi, S., Hirai, M. : *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **4**, 277 (1993)