

# 粘弾性体におけるクラック分岐に及ぼす 外的歪速度の影響

## Applied Strain Rate Contribution to Crack Branching in a Viscoelastic Solid

By

Akira KOBAYASHI, Nobuo OHTANI and Tadashi SATO

小林 昭・大谷 信男・佐藤 正\*

### 概 要

粘弾性材料におけるクラック分岐現象を調べ、外的歪速度依存性があることを見出した。これまで脆性弾性材料について得られている、 $\sigma_f \cdot c_b^{1/2} = \text{一定}$  ( $\sigma_f$  = 破断応力,  $c_b$  = クラック分岐が生じるまでの主クラックの長さ) の関係は依然成立するが、歪速度の増大は、粘弾性材料中の弾性項の優越により、応力集中度の強化となって現れる興味ある結果を得、したがって高い歪速度下では、同一の初期クラック先端半径において、破断応力が低下すること、又、それ故、分岐までの主クラック長さ  $c_b$  は長くなることなどが分かった。

### 1. はしがき

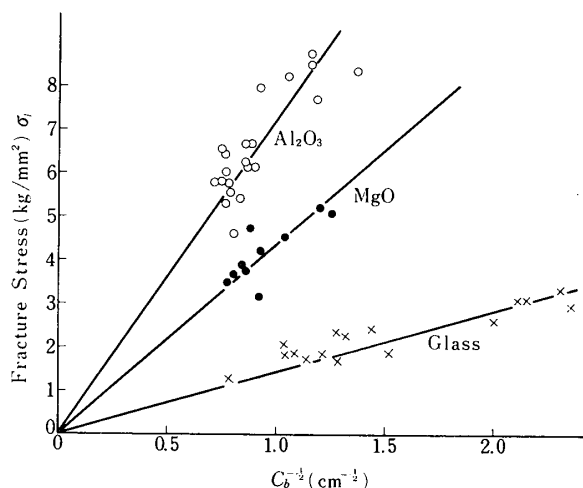
動的破壊時に進行クラック、いわゆる主クラック (main crack) の前方に、advance crack が形成され、この advance crack が、進行クラック伝播速度が充分大きい時に、進行クラック先端での弾性応力の再分布によって、主クラック伝播面に傾くことにより、クラックの分岐現象が生ずると考えられている [1]。しかし、高速クラック伝播速度のみが、クラック分岐の充分な条件ではなく、限界弾性応力拡大係数 (critical elastic stress intensity factor)  $K_B$  が進行クラック先端で存在することも必要である [2]。この  $K_B$  値が進行クラック先端で存在する実例としては、例えばガラスにおいて、破壊応力 (gross fracture stress) と破面の mirror zone の寸法との実験的關係を、Levengood [3], Shand [4], Kerper and Scuderi [5], Johnson and Holloway [6] などが観察している。この mirror zone は、丁度、分岐が生じる前に終ることが観察され、このことから、クラック分岐の時点で進行クラックに critical stress intensity が存在することが考えられる。実際には第 1 図に示されるように経験式 (empirical relation)  $\sigma_f \cdot c_b^{1/2} = \text{constant}$  (材料に依存) が成立する [7]。ここに  $\sigma_f$  = 破断応力,  $c_b$  = クラック分岐が生じるまでの主クラックの長さ。この理論づけはガラス、多結晶アルミナ、多結晶マグネシアに対しては、1967年に Congleton-Petch [7] が、脆性金属に対しては、1968年に Anthony-Congleton [8] が、更に1970年に Anthony-Chubb-Congleton [9] がガラス、軟鋼、PMMA (ポリメチルメタクリレート) について行なって居

\* 現在、東京熱処理工業(株)勤務

り、結局分岐が生じる時の進行クラック先端での限界応力拡大係数(critical stress intensity factor)  $K_B$  が、破壊靱性と関連づけられることが示され、Irwin [ 10 ]の破壊力学導入によって、 $K_B = \sqrt{\pi} \sigma_f \cdot c_b^{1/2}$  と表わすことが出来る。ただし、この式には速度効果は考慮されていない。

このように現情では、クラック分岐現象について一応の解釈が与えられているが、これらは弾性体を対象として考えて居り、外的力学条件については全く考慮して居らず、従って外的歪速度の影響についてもふれてはいない。

しかしながら、粘弾性体、例えば上述中の PMMA などは本質的に粘性要素を含むので、rate-sensitive の筈であり、それゆえ、クラック分岐を発生する動的クラック伝播を生じる為の外的変形速度、すなわち、外的歪速度の影響が皆無とは考えられないが、全く未踏査の状態である。ここでは、この粘弾性体におけるクラック分岐現象に及ぼす外的歪速度の影響を調べた結果について報告する。なお、対象材料としては前記の PMMA を用いた。



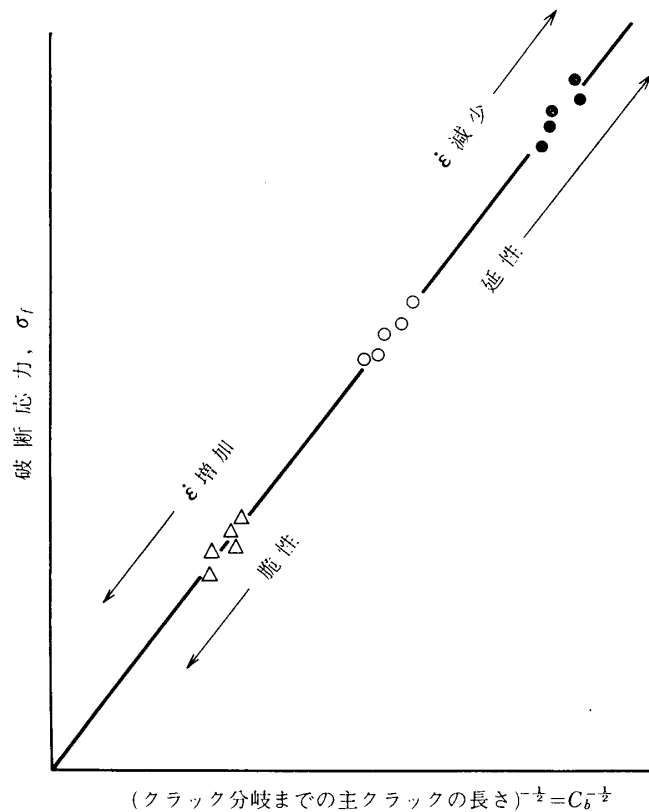
第1図 各種材料の破断応力  $\sigma_f$  とクラック分岐までの主クラック長さ  $c_b$  との相関性

## 2. 理論的考察

上述のように、弾性脆性体について  $\sigma_f \cdot c_b^{1/2} = \text{一定}$  の関係が得られているが、このデータの中には厳密には粘弾性体と考えるべき PMMA が含まれている。そこで今、一応これから解明すべき粘弾性体についても上記の  $\sigma_f \cdot c_b^{1/2} = \text{一定}$  の関係が成立つと仮定する。すなわち、第2図のように  $\sigma_f \sim c_b^{-1/2}$  の関係は直線となる。

仮に歪速度  $\dot{\epsilon}$  が増加すると考えると、粘弾性体内の弾性項が優越して来て脆性弾性化を行ない [ 11 ], クラック先端での応力集中は緩和されることが少なくなって、より応力集中度が高まり、したがって全体の破断応力  $\sigma_f$  は低くても、クラック先端で十分な局所的破断応力が得られて、クラックが発生・進行出来るので、 $\sigma_f \sim c_b^{-1/2}$  の関係に沿って  $\sigma_f$  が小さくなると、 $c_b^{-1/2}$  も小さくなり、つまり、 $c_b$  は大きくなることが予想される。

一方、外的歪速度  $\dot{\epsilon}$  が低下してくると、粘弾性体内の粘性項が優越して来て動きはじめ、



第2図  $\sigma_f \cdot c_b^{1/2} = \text{一定}$ への予想される歪速度寄与

材料特性は弾性から粘性に移り、クラック先端での応力集中は粘性流動のために弱くなって全体の破断応力  $\sigma_f$  が相当大きくなり、クラック先端での破断を生じてクラックが進行するようにならない。よって  $\sigma_f \sim c_b^{-1/2}$  の関係より、 $\sigma_f$  が大きくなると  $c_b^{-1/2}$  も大きくなり、すなわち、 $c_b$  は小さくなってくる。

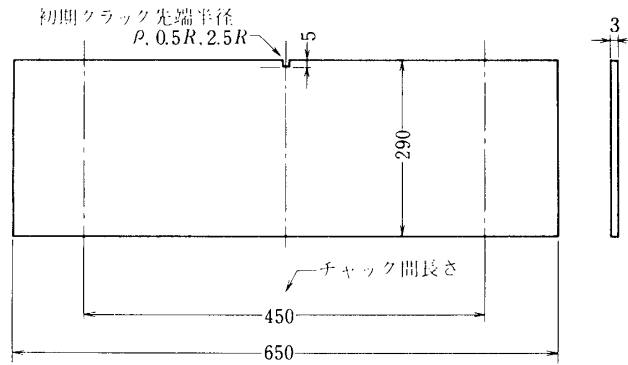
このような解釈が妥当か否かを実験的に立証してみる必要があるので、つぎに実験関係について述べる。

### 3. 実験手法

理論的考察の実験的確認を得るためには、粘弾性試験片が異なった歪速度の下で破壊しクラックが進行・分岐するようにして、その際の破断応力  $\sigma_f$  および分岐するまでの主クラックの長さ  $c_b$  を、各歪速度での実験において測定すればよい。なお、ここでは後述の負荷装置の性能上の制約のため、広範囲の歪速度をとることが出来なかったので、初期クラック先端半径  $\rho$  を変えて、異なった  $\sigma_f$  を得ることも行なってデータをふやした。

#### (1) 負荷装置

試験片にクラック伝播を発生させるためには、外部より何らかの負荷を行なう必要がある。外的歪速度効果をみるためにここでは歪速度一定の引張りを加えることとし、インストロン型定速度引張試験機 UTM-1 (東洋ボールドウィン社製) を用いた。破断荷重はロードセルに



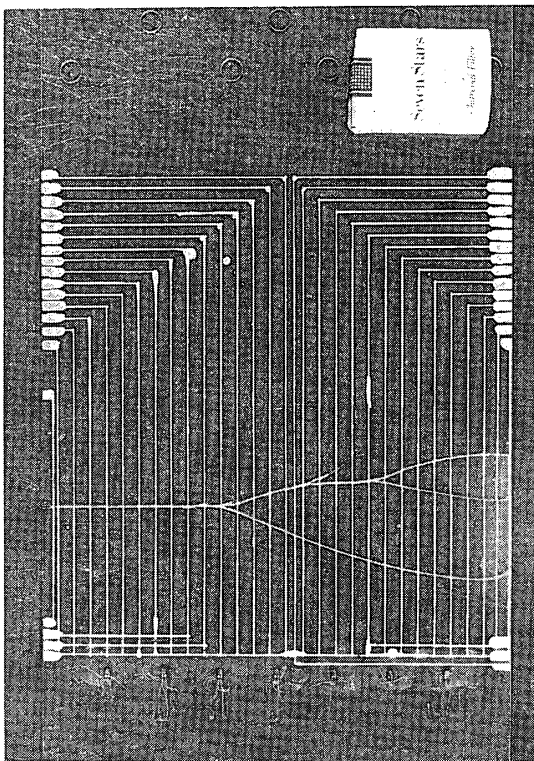
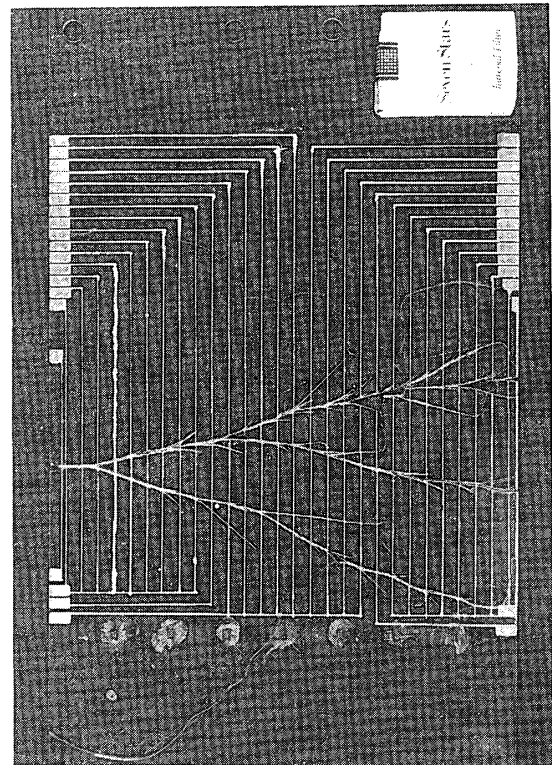
単位:mm

第3図 PMMA 試験片寸法

より計測した。

## (2) 試験片

PMMA 板(住友化学製)より, 第3図の形状の試験片を製作した。前述のように異なった初期クラック先端半径 $\rho$ として,  $\rho = 2.5\text{mm}$  および  $\rho = 0.5\text{mm}$  の2種類をそれぞれ試験片

第4図 クラック分岐を生じるまでの主クラック長さ( $c_b$ )が長い場合(PMMA 試験片)第5図 クラック分岐を生じるまでの主クラック長さ( $c_b$ )が短い場合(PMMA 試験片)

に施して、 $\rho$ のちがう2通りの試験片を用意した。なお、PMMA板のlotは2通りあるので、lot A および lot B として区別した。

### (3) 各データの測定

歪速度 $\dot{\epsilon}$ ……インストロン型定速度引張試験機で予め設定する。

破断応力 $\sigma_f$ ……ロードセルにより破断荷重を測定する。 $\sigma_f$ は初期断面積(870 mm<sup>2</sup>)で破断荷重を割って得られる。

主クラック長さ $c_b$ ……試験片表面上クラック伝播径路に沿って実測する。

## 4. 実験結果および検討

最初に $\sigma_b$ が異なったクラック分岐を行なった例を、第4～5図にかかげる。すなわち、第4図は高い歪速度ないし鋭い初期クラック先端半径の場合で、クラック分岐を生じるまでの主クラック長さ $c_b$ は長くなる。これに反し、第5図は低い歪速度又は鈍い初期クラック先端半径の場合に $c_b$ が短くなることを示している。

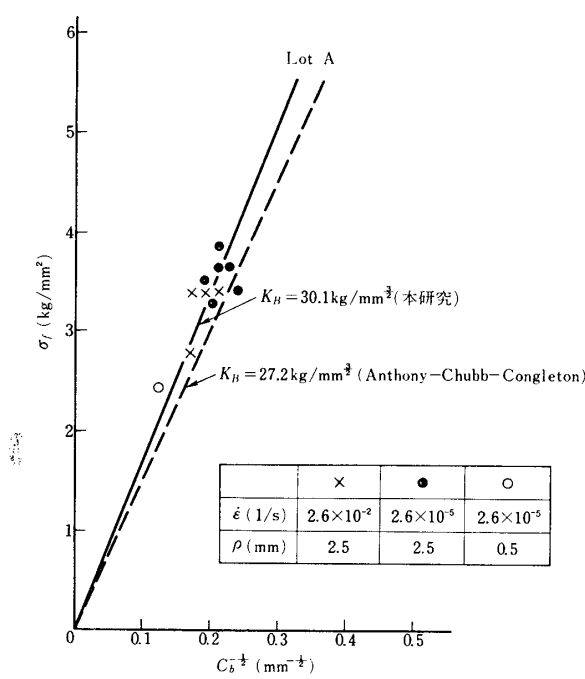
実験は二つの異なった lot について常温で行なった。すなわち、第1表に示すように、lot A から11本、lot B から15本の試験片についてのデータを得た。なお、この際の歪速度は $\dot{\epsilon} = V/L_0$  ( $V$  = 引張試験機のクロスヘッド速度,  $L_0$  = 試験片のチャック間の距離 = 450mm) で表わされる。これら実験データを $\sigma_f \sim c_b^{-1/2}$ としてプロットしたものが第6～7図である。

第1表 実験条件など

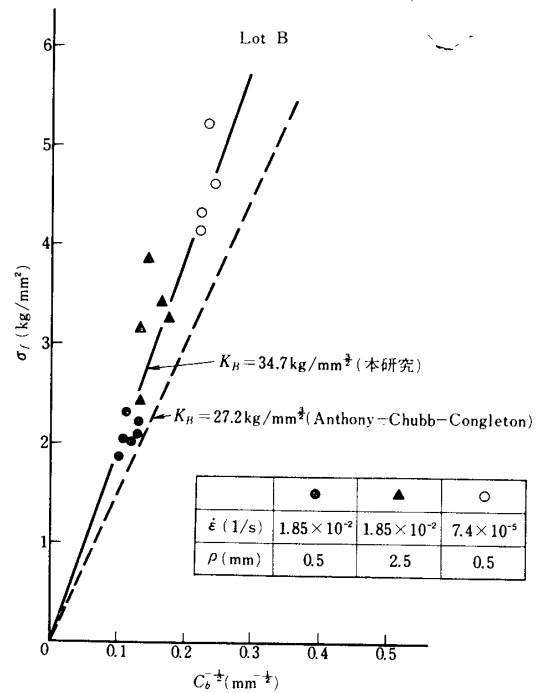
lot	lot A			lot B		
	歪速度 $\dot{\epsilon}$	$2.6 \times 10^{-5}$ /秒		$2.6 \times 10^{-2}$ /秒	$7.4 \times 10^{-5}$ /秒	$1.85 \times 10^{-2}$ /秒
初期クラック先端半径 $\rho$	2.5mm	0.5mm	2.5mm	0.5mm	2.5mm	0.5mm
試験片の数	6	1	4	4	5	6

まず第6図では多少のばらつきはあるが、 $\rho = 2.5\text{mm}$ について、 $\dot{\epsilon} = 2.6 \times 10^{-2}$ /秒の方が $\dot{\epsilon} = 2.6 \times 10^{-5}$ /秒より下側に出て居り、 $\dot{\epsilon}$ が大きくなると $\sigma_f$ が小さくなって $c_b$ は大になっている。同一の歪速度( $\dot{\epsilon} = 2.6 \times 10^{-5}$ /秒)では明らかに sharp initial notch である $\rho = 0.5\text{mm}$ の方が(実験点が一点だけではあるが)下まわって居り、応力集中度が大きいために $\sigma_f$ が低下していることを示している。lot A についての実験点は、直線上にのっていて、 $K_B = \sqrt{\pi} \sigma_f \cdot c_b^{1/2} = 1.77 \sigma_f \cdot c_b^{1/2}$ の平均値は、 $K_B = 30.1\text{kg/mm}^{3/2}$ となる。比較の為に Anthony - Chubb - Congleton [9] の PMMA による結果の平均値(第2表参照)からの $K_B = 27.2\text{kg/mm}^{3/2}$ を併記した。

第7図は lot B についてのもので、lot A に比べてよりはっきりした傾向を示している。まづ同じ初期クラック先端半径 $\rho = 0.5\text{mm}$ については、高い歪速度( $\dot{\epsilon} = 1.85 \times 10^{-2}$ /秒)の方が $\sigma_f$ は低くなっている。同じ歪速度 $\dot{\epsilon} = 1.85 \times 10^{-2}$ /秒については、 $\rho$ の小さい、すなわ



第6図 破断応力  $\sigma_f$  とクラック分岐までの主クラック長さ  $c_b$  との関係 (lot A)



第7図 破断応力  $\sigma_f$  とクラック分岐までの主クラック長さ  $c_b$  との関係 (lot B)

第2表 Anthony-Chubb-Congleton による実験結果(PMMA) [9]

主クラック長さ $c_b$ (mm)	$\sqrt{c_b}$ (mm <sup>1/2</sup> )	破断応力 $\sigma_f$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$K_B = 1.77 \sigma_f \sqrt{c_b}$ (kg/mm <sup>3/2</sup> )
29.0	5.39	2.65	25.28
31.0	5.57	2.76	27.16
21.0	4.58	3.32	26.91
19.0	4.36	3.58	27.63
12.0	3.46	4.46	27.31
13.0	3.61	4.53	28.95
			平均 27.21

ち鋭い初期クラック先端半径の方が、クラック先端での応力集中が大きいため、破断応力  $\sigma_f$  は小さくなっている。この lot B についても  $\sigma_f \sim c_b^{-1/2}$  の直線性は成立し、 $K_B = 34.7 \text{ kg/mm}^{3/2}$  となる。比較のため、Anthony-Chubb-Congleton [9] の  $K_B = 27.2 \text{ kg/mm}^{3/2}$  (第2表参照) をも示した。

上述より分かるように、初期クラック先端半径  $\rho$  が同じならば、高い歪速度は低い破断応力をもたらす、 $c_b$  を長くするが、先に理論的考察で述べたように、 $\sigma_f \sim c_b^{-1/2}$  (第2図) の直線に沿って移動していることが認められる。すなわち、粘弾性体についても、 $\sigma_f \cdot c_b^{1/2} = \text{一定}$  は成立することが立証される。なお、同じ歪速度の場合には、初期クラック先端半径が

鋭い程、破断応力  $\sigma_f$  は当然のことながら低下している。

このように高い歪速度の効果は、鋭い切欠きなどによると同様の高い応力集中を生じるが、歪速度効果が応力集中度として表われることは注目すべきことである。このことは次のように説明出来よう。まず歪速度が増加するにつれて、粘弾性体中の粘性項が応答しなくなり、働かなくなって粘性効果が減り、弾性脆性化が優越してくる。このことは、たとえば四要素モデルなどを考えれば容易に理解出来る [11]。したがってクラック先端における応力は緩和しなくなり、クラック先端での高い応力集中が生じて、全体としての破断応力  $\sigma_f$  は低下する。 $\sigma_f \cdot c_b^{1/2} = \text{一定}$  の関係が成立するならば、主クラック長さ  $c_b$  は長くなる。この逆もまた成立つことになる。このことは、前述の理論的考察で述べたことと合致し、実験的確認が得られたことになる。

## 5. 結 論

PMMA などの粘弾性体におけるクラック分岐現象に及ぼす歪速度効果について、理論的考察を行ない、その実験的確認を得、歪速度効果のあることが分った。実験は異なった切欠きのある試験片について、外的歪速度を変化させてクラック分岐を発生させ、破断応力  $\sigma_f$  と分岐までの主クラック長さ  $c_b$  を計測した結果、これまで脆性弾性材料について得られている  $\sigma_f \cdot c_b^{1/2} = \text{一定}$  の関係は依然として成立することが分かった。しかしながら、理論的考察において予期した通り、歪速度が増加すると、初期クラック先端半径が同一のものについて、 $\sigma_f$  は低下し同時に  $c_b$  は長くなることが確認された。また、逆に歪速度が減少すれば、 $\sigma_f$  は増大し、 $c_b$  は短くなる。この原因はおそらく、歪速度が増せば粘弾性体中の弾性項が優越して来るため、脆性化を示しはじめ、その結果クラック先端での応力集中が高まり、破断応力  $\sigma_f$  が低下するためと考えられる。逆に歪速度が減少すれば粘性項が優越してくるので、クラック先端での応力集中は弱まって来、したがって全体としての破断応力  $\sigma_f$  は増大するためと思われる。このように歪速度効果が、応力集中効果として現われてくることは興味あることである。先に PMMA について歪速度効果を考慮しない場合に得られている Anthony-Chubb - Congleton [9] による限界応力拡大係数  $K_B$  と比較すると、極めて良い近似が得られている。

## 謝 辞

東大宇宙航空研究所 河田幸三教授の御激励に感謝するものである。又、かって同所小林研究室に於て実験に協力された野坂慶蔵君、麻生田栄寿君および西倉茂君に謝意を表すものである。

1975年6月13日 材料部

## 参 考 文 献

- [1] E. Yoffe, Phil. Mag. 42, p. 739 (1951)
- [2] A. B. J. Clark and G. R. Irwin, Expl. Mech. 23, p. 321 (1966)
- [3] W. C. Levengood, J. Appl. Phys. 29, p. 820 (1958)
- [4] E. B. Shand, J. Am. Ceram. Soc. 37, p. 52 (1954) and Ibid, 37, p. 559 (1954)

- [5] M. J. Kerper and T. G. Scuderi, *Bull. Am. Ceram. Soc.* 43, p. 622 (1964)
- [6] J. W. Johnson and D. G. Holloway, *Phil. Mag.* 14, p. 731 (1966)
- [7] J. Congleton and N. J. Petch, *Phil. Mag.* 16, p. 749 (Oct. 1967)
- [8] S. R. Anthony and J. Congleton, *Metal Science Journal*, 2, p. 158 (1968)
- [9] S. R. Anthony, J. P. Chubb and J. Congleton, *Phil. Mag.* p. 1201 (Dec. 1970)
- [10] G. R. Irwin, *J. Appl. Mech.* p. 361 (Sept. 1957)
- [11] A. Kobayashi, N. Ohtani and T. Sato, *J. Appl. Polymer Sci.* 18, p. 1625 (June 1974)