

ポリカーボネートの疲労き裂進展における加速および遅延に対するフラクトグラフィ的検討

愛媛大学 工学部 正 ○白石哲郎
 " " 正 菅山義朗
 新居浜工業高等専門学校 正 森慎之助

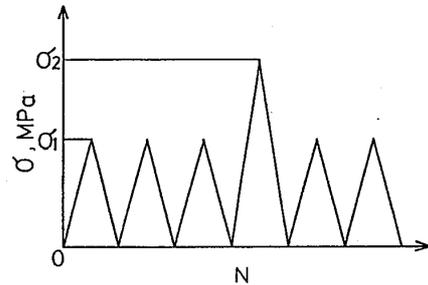
1 緒言 プラスチック材料の疲労き裂進展に及ぼす荷重変動の影響を明らかにするため、著者は、非晶性プラスチック材料の一つであるポリカーボネートを用いて、単一過大荷重や二段二重変動荷重を負荷した場合のき裂進展挙動を検討してきた⁽¹⁾。その結果、荷重上昇時のき裂進展の顕著な加速や荷重下降後の遅延が現象的にはある程度明らかになった。これらの現象は傾向的には従来から知られている金属材料の場合と類似のものであったが、例えば、1)加速進展量が金属材料の場合よりきわめて大きい、2)最大遅延の遅れが認められない、3)加速、遅延挙動とき裂開口挙動が必ずしも対応しない、など金属材料の場合とは本質的に異なると思われる点もいくつか認められた。

一方、この材料の疲労破面の形態は応力増大係数幅 ΔK の大きさによって異なり、低 ΔK 域では不連続き裂成長面 (Discontinuous Growth Band, 以下 D.G.B.)、高 ΔK 域ではストライエーション、中間 ΔK 域ではティアラインなどが観察される。これら破面形態の違い、言い換えれば、き裂進展機構の違いと加速あるいは遅延挙動の関係を明らかにすることは、この材料における加速および遅延現象の本質を理解する上で何らかのヒントを与えるものと考えられる。そこで本研究では、前報⁽¹⁾を引き続き若干の追加実験と破面観察を行うことにより、これらの現象に対するき裂進展機構からの検討を行った。また、加速進展量の板厚方向への変化や単一過大荷重と多数回過大荷重までの遅延領域の相違などについても検討を加え、二、三の知見が得られたので報告する。

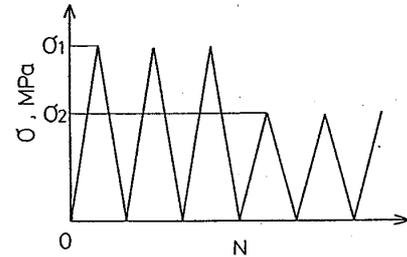
2 供試材料および実験方法

供試材料は前報⁽¹⁾と同様である。すなわち、素材は厚さ 5 mm の市販のポリカーボネート板 (タキロン PC-1600) であり、素材から片側き裂 (深さ 3 mm) を有する板状試験片 (50 mm × 180 mm × 5 mm) を作製し、140℃、5 hr の熱処理を施した。熱処理後の引張降伏応力 σ_0 は 67.6 MPa であった。実験には標準サーボペット Lab-5 型引張用縮減疲労試験機を用い、雰囲気温度 25 ± 1℃、繰返し速度 1 Hz のもとで荷重制御の完全半振り引張疲労試験を行った。図 1 に荷重負荷方法を示す。図 1(a) は単一過大荷重を負荷する場合で、過大荷重負荷時のき裂進展の加速および負荷後の遅延を検討するための

ものである。本研究では種々のき裂進展域における単一過大荷重の影響を調べるため、前報⁽¹⁾で行った実験に加え若干の追加実験を行った。すなわち、前報では基準応力 σ_1 を 6.9 MPa および 9.8 MPa とし、過大荷重比 r ($= \sigma_2 / \sigma_1$) を 1.5, 2.0 および 2.5 としたが、本研究では、 $\sigma_1 = 13.7$ MPa の条件を加え、さらに $r = 1.1, 1.2$ の実験も行った。また、過大荷重の負荷は内部のき裂長さが主として 4 mm (場合によっては 5, 6, 7, 10 mm) になった時時点で手動 (約 0.1 Hz) により行った。き裂長さの測定には読み取り顕微鏡を用い、その焦点位置を試験片表面および内部に合わせることにし、表面と内部のき裂長さを同時に測定した。図 1(b) は多数回過大荷重の場合であり、過大荷重も多数回繰返した後の遅延挙動を調べるために行った。このような場合の遅延領域では、単一過大荷重の場合と異なり、特徴的な帯状の領域が見られることを前報⁽¹⁾で報告したが、この点についてもさらに検討を加えた。なお、破面観察には光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡を用いた。



(a) 単一過大荷重



(b) 多数回過大荷重

図 1 荷重負荷方法

3 実験結果および考察

3.1 き裂進展の加速

図 2 は D.G.B. 進展域およびストライエーション進展域における代表的なき裂進展の加速領域である (光顕写真)。また、図 3 はこれら加速領域の走査電顕観察例である。図 2 の各写真中

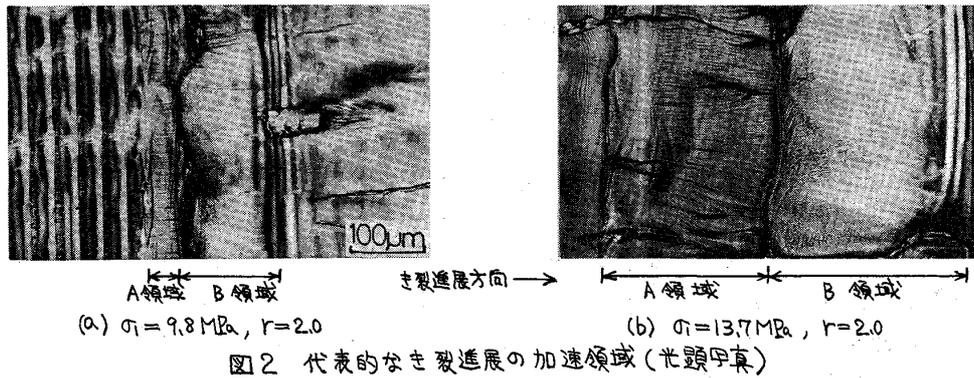


図2 代表的なき裂進展の加速領域(光顕写真)

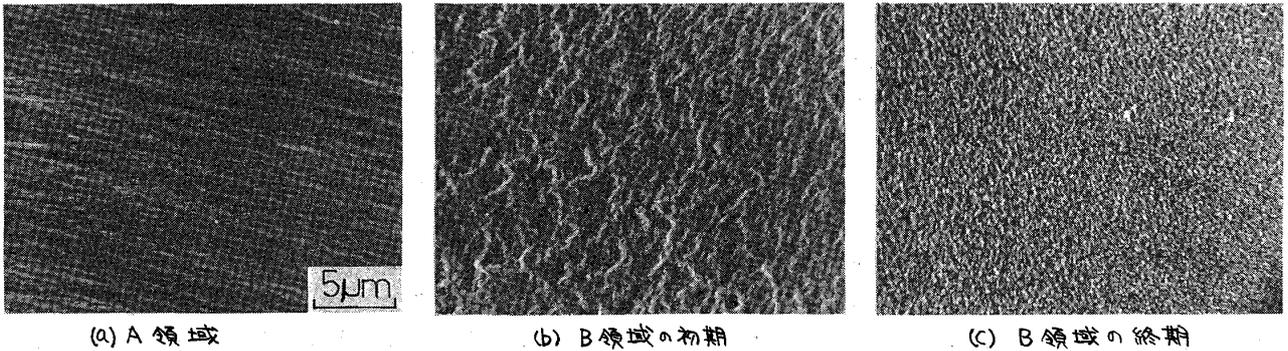


図3 加速領域の走査電顕写真(D.G.B.進展域での加速領域)

尖部が加速領域であるが、いずれの場合も、き裂進展方向に平行なすじ状模様(A領域)とそれに続いて粒状模様(B領域)が観察される。なお、すじ状模様は加速進展量が小さくなるにつれて不明瞭となり、その幅も小さくなる傾向であった。著者らは、前報¹⁾において、この材料の加速進展量が金属材料のそれと比べ極めて大きいことを示し、それが加速進展機構の違いによるものであると推定した。すなわち、金属材料における加速進展機構はすべり面分離によるいわゆるストリッピングであり、その破面は一見“無特徴”な形態を示す。これに対し、ポリカーボネートの場合、まずA領域のすじ状模様は図3(a)からわかるように細かいティアラインから成っており、それはストライエーション内で見られる破面形態と類似である。またB領域で見られる粒状模様は多数のボイドから成っており、その粒径がき裂進展方向に向かって次第に小さくなる〔図3(b), (c)参照]など、D.G.B.内の破面形態と類似している。この種の材料におけるストライエーションやD.G.B.の形成なき裂先端部に生じるクレイズと密接に関係している²⁾。したがって、加速進展機構もクレイズに起因したものであり、クレイズが何らかの形で著しい加速に誘起していることが考えられる。この点についてはまだ十分明らかでないが、著者らは一応次のように考えている。一般にこの種の材料では、き裂の進展に先行してき裂先端部にクレイズが形成される

が、あらかじめクレイズを生じた場合の破壊じん性値はそうでない場合に比べ著しく低下することが知られている³⁾。これはクレイズの形成に要するエネルギーが除かれたためとされている。疲労き裂の場合にも、応力の繰返しによってその先端部にはある程度のクレイズが形成されているものと思われる。このようなりレイズは過大荷重負荷時のき裂進展を容易にし、このことが顕著な加速の一因ではないかと考えられる。

図4は種々のき裂進展域で過大荷重を負荷した場合のき裂進展の加速率を過大荷重比 r で表わしたものである(試験片内部)。ここで α はあらかじめ求めた定常き裂進展速度(0.1Hz)に対する加速率である。加速率はき裂進展履歴(加速前のき裂進展機構)の影響をほとんど受けず、 r が約1.5までの間は r とともに急

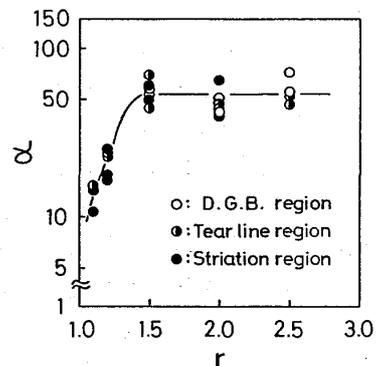


図4 き裂進展の加速率とrの関係

激に増加するが、 r が1.5以上ではほぼ一定値(約50)を示すことがわかる。

図5は $\Delta Q_{o.L.}$ の荷重方向への変化を示したものである。なお、試験片表面での測定値は疲労試験中の鏡面取り顕微鏡で測定した値を示している。せん断線と垂直破面の境界近傍で $\Delta Q_{o.L.}$ が著しく減少していることがわかる。この部分では荷重の増減効果が抑えられており、せん断線に対して強い抵抗になっていることが推察される。前者は、試験片で、 r が1.5から2.5の範囲内では、試験片内部の加減荷重も最大荷重下へと移行される平面ひびき増進域と法とほぼ同じであることを示した。このことは平面ひびき増進域が加減荷重を吸収する一つの因子であることを見出すものであるが、図5の結果から判断して、せん断線も加減荷重の少なからず影響を及ぼしているように思われた。

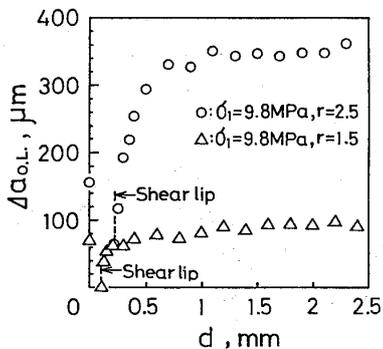
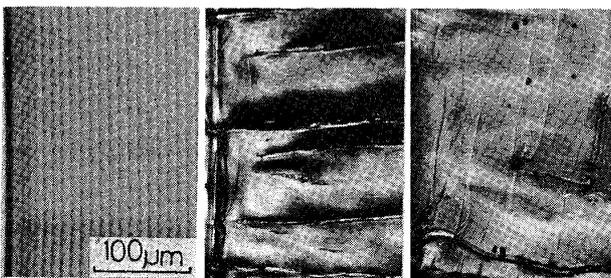


図5 試験片表面からの深さと $\Delta Q_{o.L.}$ の関係

3.2 せん断進展の遷延

図6は遷延領域におけるせん断進展機構の違いを示したもので、(a)ではD.G.B., (b)ではティアライン, (c)ではストライエーションを形成する進展機構になっている。それぞれの場合の最大遷延速度比 [定常せん断進展速度 $(da/dN)_c$ / 遷延速度 $(da/dN)_c / (da/dN)_d$] $_{max}$ を求めること図7のようになる。 σ_1 の低下とともに遷延が顕著になることはすでに報告したとおりであるが、それがせん断進展機構に対応していることがわかる。このことから、遷延挙動に対してはせん断進展機構が密接に関係していることが推察される。



(a) $\sigma_1 = 6.9 \text{ MPa}$ (b) $\sigma_1 = 9.8 \text{ MPa}$ (c) $\sigma_1 = 13.7 \text{ MPa}$
図6 遷延領域におけるせん断進展機構の違い ($r=2.0$)

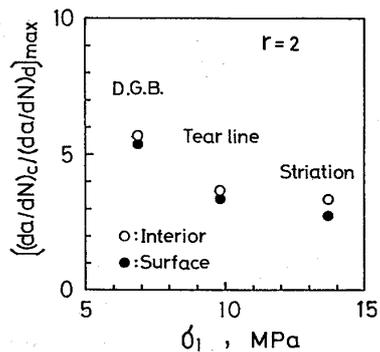


図7 最大遷延速度比と σ_1 の関係

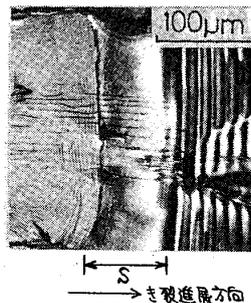


図8 多数回過大荷重負荷後の遷延領域 ($\sigma_1 = 14.7 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 6.9 \text{ MPa}$)

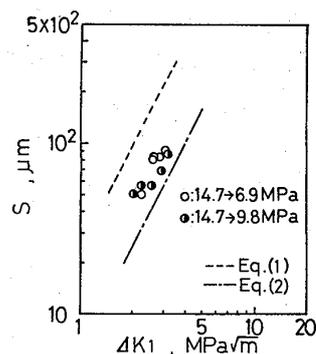


図9 $S \propto \Delta K_1$ の関係

図8は多数回過大荷重負荷後の遷延領域を示す一例である。前報で報告したように、単一過大荷重の場合と異なり、特徴的な帯状の遷延領域が見られる。この領域の幅 S と荷重下降直前の応力増大係数幅 ΔK_1 の関係を求めること図9のようになる。図中には次式により求めた一方増進域と法 R_m および遷延せん断増進域と法 R_c をそれぞれ破線および一点鎖線で示している。

$$R_m = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi} \left(\frac{\Delta K_1}{\sigma_1} \right)^2 \quad (1) \quad R_c = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi} \left(\frac{\Delta K_1}{2\sigma_2} \right)^2 \quad (2)$$

S は R_m と R_c の中間の値を示しており、これら増進域と法と密接に関係していることがわかった。

4 結論 以上の結果、1)加減領域ではせん断進展方向に平行なすべり機構の領域と多数のボイドから成る帯状機構の領域が見られる、2)加減率は加減前のせん断進展機構の影響をほとんど受けず、過大荷重比のみに依存する、3)加減進展量はせん断線と垂直破面の境界近傍で著しく減少する、4)遷延挙動はせん断進展機構と密接に関係する、5)多数回過大荷重の場合に見られる特徴的な遷延領域はせん断増進域に対応する、などが明らかになった。

[参考文献] 1) 白石, 曾山, 森, 材料, 34, 406 (1985).
2) 白石, 曾山, 森, 材料, 35, 152 (1986). 3) 北川, 4時沢, "フラクトグラフィ", p.146 (1977) 培風館. 4) 成沢, "高分子材料強度学" (横堀監修), p.325 (1982) オ-4社. 5) 成沢, 近土, 材料, 21, 315 (1972).