

ポリカーボネートの引張・圧縮疲れ挙動に関する研究  
内田 武\*・福村 佳英\*\*

Research in Tension-compression Fatigue Behavior of Polycarbonate  
Takeshi UCHIDA\* and Yoshihide FUKUMURA\*\*

In the present study, PC in the excellent transparency is assumed to be a testing material. It doesn't influence the fatigue limit of the uniform gauge test piece too much. The acting minute and drill hole processing is given as a crack generation starting point, and the crack progress behavior is observed continuously with Tension-compression fatigue tester.

It compared it by cantilever-type rotating bending law of PC and tension-compression fatigue law with the data of researched PMMA in this laboratory in the past, and research results of progress behavior of fatigue crack obtained for this research.

This time, a continuous observation was executed by taking the replica of the crack by using the one that the ethanol was added to methyl cellulose solution (3wt%) to observe the progress behavior of the crack continuously. First of all, it did not influence the fatigue limit too much, and the diameter and the depth of crack generation starting point of notched materials were investigated. As a result, it turned out that the influence that it had on the notch fatigue longevity was a little at 0.15mm in the diameter and 0.20mm in depth.

The research greatly did four comparative testing. First of all, the stress was changed into 12, 15, and 20MPa and it researched. Next, stress ratio R was changed into -0.5 and -1.0 and -2.0 and it researched. In addition, the difference of the material with a test methodology and a different character is confirmed. Therefore, the data of cantilever-type rotating bending examination method of PC and data of tension-compression fatigue examination method of PMMA clarified by a past research was compared with this research results.

The graph was made from the result of obtaining because of each examination, and the comparison and the examination were executed. As a result, it is thought that it is understood that the crack progress speed increases as the stress grows, and there is a stress dependency at the crack progress speed. Next, it is understood to be able to approximate by the straight line in each stress and the stress ratio when the crack progress speed and the width of the stress expansion coefficient change are taken in the graph by the double logarithm, and to exist in the proportion. As for the progress behavior of the fatigue crack of PC, by tension-compression fatigue examination method, it has been understood to arrange it from  $\Delta K$  it is possible to recur by the straight line by one regardless of the stress or the stress ratio though there are a few differences.

**Key Word** : Plastics, PC, Tension-compression fatigue, Notched specimen, Fatigue life, Stress ratio, Crack propagation

## 1. 緒言

プラスチック材料は第二次世界大戦後から本格的に使用され始め、産業の高度成長期に伴う有機合成化学の発展、既存材料のアロイ化や複合化技術の貢献により現在の地位を確立した。最近では、従来の汎用プラスチックよりも機械的性質を改善させたエンジニアリングプラスチック（エンブラ）が次々と登場している。これらは、軽量化による燃費改善での環境負荷低減、高性能化、一体成形などによる加工工程削減、その他に防錆性・無潤滑・低騒音、高い比強度を持つことから構造材料、機械部品材料など過酷な環境下でも積極的に使用されるようになった。今後さらに、より強力な複合材としてだけでなく、リサイクル性や加工性などの面からもプラスチック単体の需要が高まるものと見られ<sup>(1)</sup>、その性質の向上が要求されるのは必至である。

プラスチック材料が、今日あらゆる分野で使用・開発されているのは、軽量であり、成形性・着色性がよいという特徴を持っており、さらに複合化・新機能付加が他の材料に比べて比較的容易であるためである。要求が多くなっている現在、この材料が持つ可能性と期待は大きいと思われる。プラスチック材料そのものは、新材料と言えなくなっているが、単体材料の改質・新機能付加・複合化ならびに、新しい分子構造を持つプラスチックなどの研究は、多くの研究者が関わっている。

今回試験片として使用するプラスチックの一種であるポリカーボネート樹脂（以下、PC）は、1958年の商業生産開始以来、その優れた特性、透明性、耐衝撃性、耐熱性、寸法安定性、自己消火性など、それらのバランスの良さにより、フィルム、シート、自動車用途、コンピュータハウジング、DVD等の光ディスク、自動車窓ガラスなど、次々に革新的な用途に採用され需要を拡大<sup>(1)</sup>してきた。

プラスチック材料は、その性質から多岐にわたり使用されている。実際、機械・構造物の破損例の約80%が、直接的あるいは間接的に疲れ現象が原因とされている。疲れ破壊とは一回の負荷では破断しない応力でも、繰返し負荷が

\* 機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

\*\* 専攻科, 生産工学専攻2年

(Advanced Production Engineering Course, 2nd grade)

かかることで破断してしまう現象のことである。金属材料は疲れに関しては、今日も多くの研究が行われている。しかし、プラスチック材料を金属や合金などの代替材料としての工業用途あるいは構造用途に利用する際に、強度や耐久性について調査する必要がある、現実には部材の疲れにより、機器の破壊が発生している。例えば、室内遊具の滑り台、扇風機の羽根などが疲れ破壊しており、どちらも重大な事故には至っていないが大変危険なことである。それを未然に防ぐためにも、プラスチック材料の強度的特性の評価、特に疲れ挙動に関する検討は必要である。

機械や構造物などが受ける外力や変形は、複雑に変動するが通常である。しかし、疲れ試験では材料の力学的応答や基本的な疲れ強度特性を明らかにするために、単純な応力や変形の連続荷重が用いられている。ここで、代表的な疲労試験機には回転曲げ疲れ試験機、平面曲げ疲れ試験機および油圧サーボ疲れ試験機<sup>(2)(3)</sup> などがある。

本研究では、透明性に優れている PC を試験材料とし、平滑試験片の疲れ限度にそれほど影響を与えず、き裂発生起点として作用する微小ドリル穴加工を施した。試験は引張・圧縮の負荷繰返しを行い、疲れ特性およびき裂進展挙動について連続観察を行った。また、当研究室でこれまでに実施してきた PC の片持ち回転曲げ疲れ試験結果、ならびにポリメチルメタクリレート（以下、PMMA）の引張・圧縮疲れ試験結果との比較・検討も行った。

表 2-1 PC の機械的性質

ヤング率 [GPa]	引張強さ [MPa]	耐力 $\sigma_{0.2}$ [MPa]	曲げ強さ [MPa]	伸び [%]	比重
1.5	54.9	65.1	95	87.9	1.2

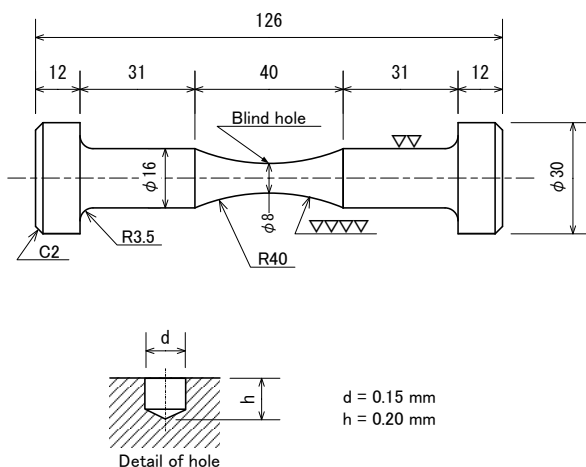


図 2-1 試験片の形状・寸法

## 2. 試験片および試験方法

### 2.1 試験片

材料は非晶性で熱可塑性樹脂である PC（原料：帝人化成(株)、加工：テイヨー(株)）であり、表 2-1 に機械的性質、図 2-1 に引張・圧縮疲れ試験に使用した試験片の形状・寸法を示している。試験片は直径 30mm の市場供給の透明丸棒から旋削加工された砂時計型である。今回この材料を採用したのは、透明であるため、き裂の進展挙動が確認しやすいためである。

試験片は、旋削加工後、試験片湾曲部を中心に #360～2000 のスポンジ研磨材および耐水ペーパーで注意深く研磨し、最終研磨に 0.5 $\mu$ m のアルミナ水溶液で完全な透明に仕上げた。仕上げ後、今回、試験片は小穴材を使用するため、ミニボール盤を用いて、試験片の湾曲部中心に微小ドリル穴加工を施した。その後、旋削加工および研磨作業によって生じた残留応力が試験結果に与える影響を考え、焼きなまし処理を行い、残留応力を取り除いた。焼きなまし処理温度は PC の粘弾性測定で出たガラス転移温度約 141 $^{\circ}$ C (414K) と試料の熱変形温度の 128 $^{\circ}$ C を考慮して、128 $^{\circ}$ C とした。熱処理工程は図 2-2 に示したように、まず 100 $^{\circ}$ C/hr の昇温速度で 128 $^{\circ}$ C (405K) まで加熱し、128 $^{\circ}$ C で 10 時間保持した。その後、-10 $^{\circ}$ C/hr の降温速度で室温まで炉内で徐冷し、実験までその状態を保持した。

### 2.2 試験方法

疲れ試験は、図 2-3 に示した引張・圧縮疲れ試験機（カヤバ工業(株)）を用いて、すべて荷重制御で行い、室温 23 $^{\circ}$ C、繰返し速度 20Hz で実施した。図 2-3(a)(b)(c)は、それぞれ試験機本体、試験片取付け部、制御装置である。

今回、き裂の進展挙動を連続観察するために、メチルセルロース水溶液（3wt%）にエタノールを加えたものを用いて、き裂のレプリカを取ることで連続観察を実施した。き裂長さは、円周に沿った長さのレプリカを写し取った。き裂長さ測定には顕微鏡を使用した。エタノールを加える割合やレプリカ法の検定は、後述の試験結果で述べる。

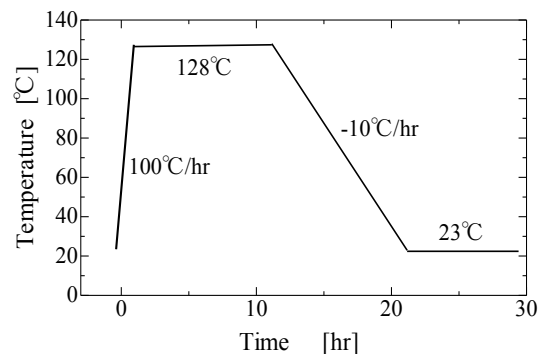


図 2-2 PC 試験片の熱処理工程

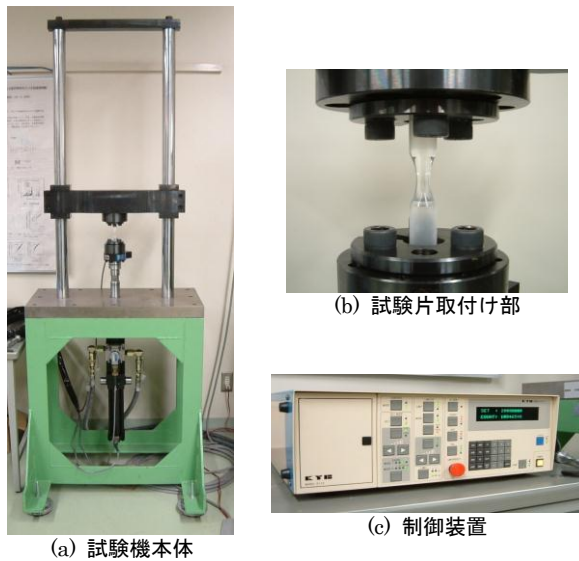


図 2-3 引張・圧縮疲れ試験機

### 3. 試験結果および考察

#### 3. 1 切欠きの直径・深さおよび切欠き係数

き裂進展の連続観察は平滑材で行うのが理想であるが、き裂発生を観察することが困難なため、切欠き材を使用した。き裂が切欠きから発生し、疲れ限度にそれほど影響を与えない微小ドリル穴の調査を行ったところ、切欠きの直径は約 0.15mm、深さは約 0.20mm であった。

図 3-1 は切欠き材の応力と繰返し数の関係 (S-N 曲線) で、矢印を付けた試験片は繰返し数が  $10^7$  回を超えても破断しないため、試験を中止したものである。平滑材として示した曲線は、以前<sup>(4)</sup> 試験した繰返し速度 20Hz のデータについて曲線で帰属したものである。

図 3-1 より、平滑材の曲線に比べて、切欠き材の疲労寿命は短いことから、切欠きの影響があることがわかる。平滑材の疲れ限度は約 11MPa で、切欠き材の疲れ限度は約 8.5MPa であった。

ここで切欠き係数  $\beta$  とは、平滑材の疲れ限度を切欠き材の疲れ限度で割った比率で、切欠き材の疲れ限度が平滑材の疲れ限度に対して、どれぐらい低下するかを示したパラメータのことである。今回の切欠き係数  $\beta$  は、

$$\beta = \frac{11}{8.5} = 1.29 \quad (1)$$

であり、切欠きの影響はそれほど大きくない。

#### 3. 2 レプリカ採取法の検定

き裂の連続観察を行う上で、き裂の確認と保存が必要である。そこで、図 3-2 にメチルセルロース水溶液にエタノールを混ぜたものが、き裂を写し取ることができるかの確認を行った写真を示している。ここで、メチルセルロース水溶液の乾燥を早めるためにエタノールを加えることにし

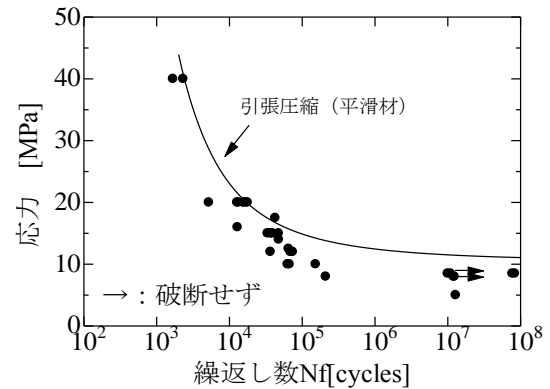
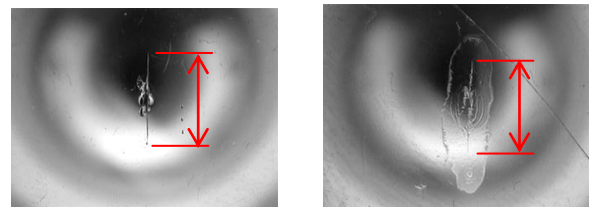


図 3-1 PC 切欠き材の S-N 曲線



(a) 実際のき裂 (b) レプリカ採取したき裂

図 3-2 き裂のレプリカ採取の検定

たが、試験片に影響を与えず比較的単時間で乾燥が完了するエタノールの割合を調査したところ、エタノール配合割合は全体の約 25% であった。

図 3-2 より、実際のき裂とレプリカ採取き裂の長さを測定したところ、5.52mm と 5.46mm であった。このレプリカ採取法で実際のき裂の約 99% を写し取れているので、今回はこの方法でき裂の連続観察を実施することにした。

#### 3. 3 小穴材のき裂進展挙動

き裂進展挙動の調査は、今回は 3 応力レベルの疲れ試験過程で実施した。設定した応力は、疲れ限度付近である 12MPa、寿命が  $10^4$  回を超える時間強度付近の 20MPa、それらの中間程度応力の 15MPa の 3 レベルである。

今回、振幅応力が 20MPa 時のき裂レプリカのサンプルを図 3-3 に示す。破断した繰返し数(寿命)  $N_f$  は 14368 回で、破断した繰返し数を 1 としたときの相対繰返し数比は、(a) は 0.58, (b) は 0.61, (c) は 0.73, (d) は 0.82, (e) は 0.94 である。き裂は明瞭に採取できていること、微小ドリル穴の縁から成長開始し、相対繰返し数比が大きくなるにつれてき裂が成長していることがわかる。

図 3-4 はき裂長さと繰返し回数とを比較したグラフで、12MPa (図中○印)、15MPa (図中●印)、20MPa (図中▲印) の観察結果を示している。このグラフより、同応力でもき裂が成長するまでの繰返し回数のばらつきが見取ることができる。これは、試験片の個体差が原因だと考えられ、例えば製造会社は同じでも生産ロットの違い、丸棒か

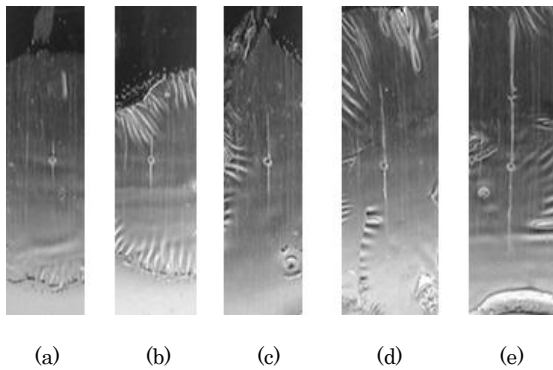


図 3-3 PC 切欠き材のき裂成長例 (20MPa, レプリカ)

らの試験片採取位置の違いなどが挙げられる。そのため、個々の試験片内部の介在物やキズには同一のものはないため、このことが個体差として現れると考えられる。

図 3-5 はき裂進展速度と相対繰返し数比の関係を比較したグラフで、き裂進展速度は

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_i - a_{i-1}}{N_i - N_{i-1}} \quad (2)$$

の式を利用して求めている。き裂進展速度は、1 サイクルあたりに進行する平均き裂長さである。

これによると、き裂の発生は相対返し数比では疲れ寿命の後半に位置していることがわかる。高応力では相対繰返し数比 0.6 付近でき裂の発生が確認できるが、低応力でのき裂の発生は 0.7~0.8 付近で、き裂伝播に要する寿命が短いことがわかる。また、応力が高くなるにつれてき裂進展速度が大きくなっていることから、き裂進展速度には応力依存性があると考えられる。

図 3-6 にき裂進展速度と  $\Delta K$  (応力拡大係数変化幅) の関係を示している。

今回の応力拡大係数  $K$  の算出には、便宜的に

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad [MPa\sqrt{m}] \quad (3)$$

を利用した。ここで、 $\sigma$  は応力、 $a$  はき裂半長である。

多くの金属・非鉄金属材料において、き裂進展速度 ( $da/dN$ ) と  $\Delta K$  の間には、次のような関係がある。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

ここで、 $C$ 、 $m$  は材料、環境などにより決まる定数である。上式はパリス則<sup>9)</sup>と呼ばれ、これが成立するのは、安定き裂成長段階のき裂である。今回は観察結果を直線回帰することで、パリス則に従うかも含めて調査した。

調査の結果、グラフの傾き ( $m$  値) は、12MPa で 0.758、15MPa で 1.00、20MPa で 0.848 であり、各直線の傾きに多少の違いはあるが、応力に関係なく 1 本の直線で表現できることがわかった。図 3-6 の直線は全データを 1 本の直線で回帰したもので、その傾きは 0.874 (相関係数 0.867)

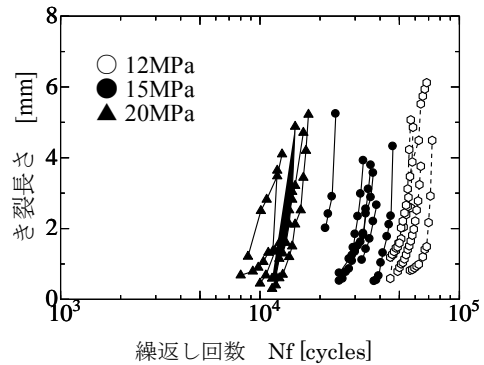


図 3-4 き裂長さと繰返し回数の関係

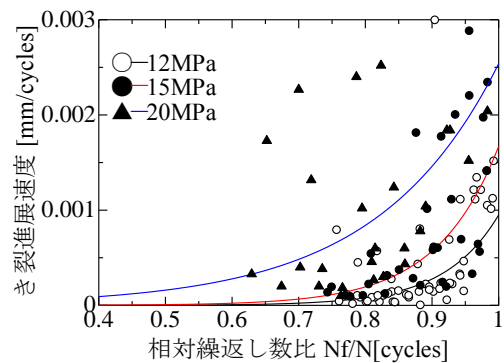


図 3-5 き裂進展速度と相対繰返し数比の関係

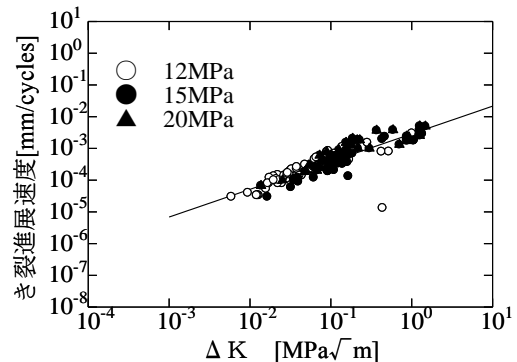


図 3-6 き裂進展速度と  $\Delta K$  の関係

となった。多少のばらつきは認められるものの、応力に関係なく 1 本での直線回帰には妥当性が認められる。すなわち、PC の引張圧縮疲れによるき裂の進展挙動は、 $\Delta K$  により整理することが可能である。

### 3. 4 小穴材のき裂進展挙動 ~ 応力比を変化した場合 ~

図 3-7 および 3-8 は、応力比を  $R=0.5$  (図中▲印),  $R=1.0$  (図中●印),  $R=2.0$  (図中□印) と変化させた際の、最大応力と繰返し回数の関係、振幅応力と繰返し回数の関係である。最大応力で整理したそれぞれの疲れ限度は、 $R=0.5$  で 8.5MPa,  $R=2.0$  で 6.5MPa であった。 $R=0.5$  では  $R=1.0$

の時と変化していないが、 $R=-2.0$  では疲れ限度が低下している。次に、振幅応力で整理したそれぞれの疲れ限度は、 $R=-0.5$  で  $6.5\text{MPa}$ 、 $R=-2.0$  で  $10\text{MPa}$  であった。このグラフから、 $R=-0.5, -1.0, -2.0$  の順に疲れ寿命が長くなっていることがわかる。これは、応力比の変化に伴う引張力と圧縮力の割合の変化が原因だと考えられる。

図 3-9 および 3-10 は、最大応力が  $12\text{MPa}$  と  $20\text{MPa}$  でのき裂長さと繰返し回数の関係である。図 3-9 より巨視的に見て、応力比を変化させてもグラフに大きな変化が見られないことから応力比変化はき裂成長に影響を与えないことがわかる。図 3-10 より巨視的にみると試験片の個体差に

よる誤差はあるものの、その成長過程や破断回数は類似していることがわかる。つまり、応力・応力比の変化による違いは、このグラフからは読み取れないことが分かる。

図 3-11 および 3-12 は、最大応力が  $12\text{MPa}$  と  $20\text{MPa}$  でのき裂長さと相対繰返し数比の関係である。これによると、試験片個体差はあるものの、巨視的に見るとき裂の発生は相対繰返し数比では疲れ寿命の後半に位置していることがわかる。また、どの応力比の場合も、き裂の発生ならびに成長の仕方が類似していることが分かる。このことから、応力に関係なく応力比の変化は、き裂の発生ならびに成長の仕方あまり影響を与えないことが考えられる。

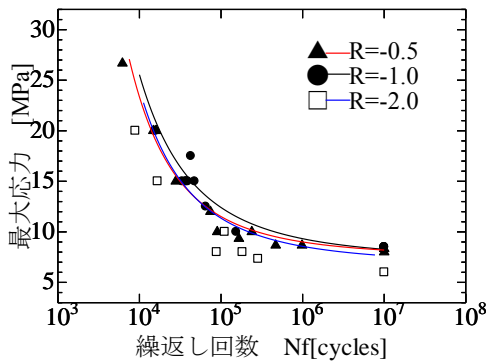


図 3-7 最大応力と繰返し回数の関係

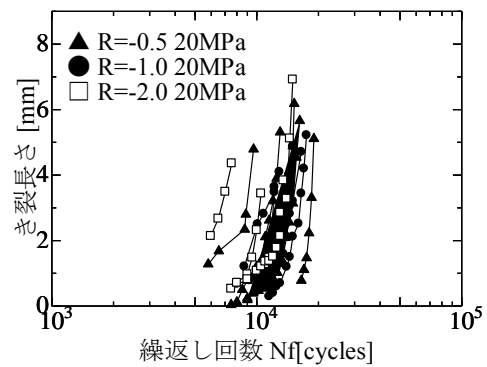


図 3-10 き裂長さと繰返し回数の関係

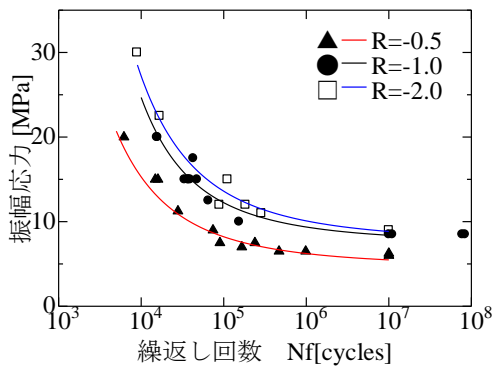


図 3-8 振幅応力と繰返し回数の関係

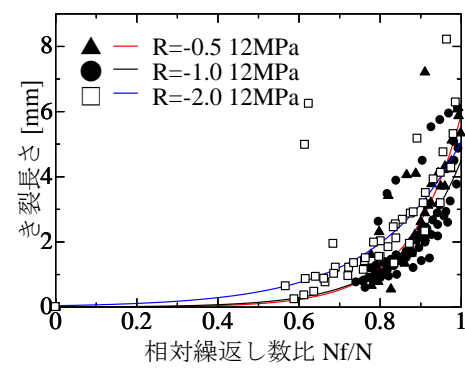


図 3-11 き裂長さと相対繰返し数比の関係

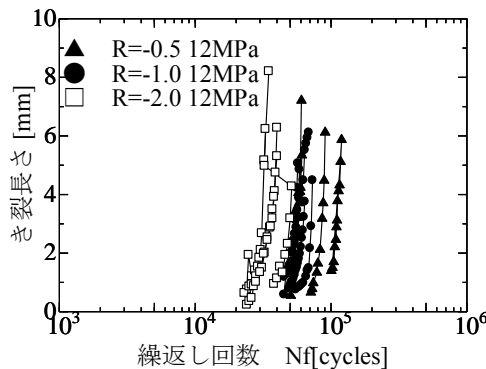


図 3-9 き裂長さと繰返し回数の関係

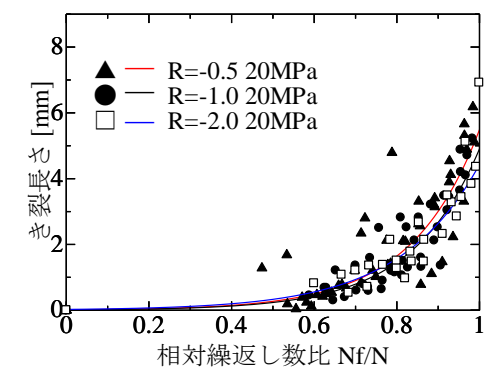


図 3-12 き裂長さと相対繰返し数比の関係

図 3-13 および 3-14 は、最大応力が 12MPa と 20MPa でのき裂進展速度と  $\Delta K$  (応力拡大係数変化幅) の関係である。12MPa での傾きは  $R=-0.5$  で 0.891,  $R=-1.0$  で 0.974,  $R=-2.0$  で 0.863 に対し、20MPa での傾きは  $R=-0.5$  で 1.004,  $R=-1.0$  で 0.848,  $R=-2.0$  で 0.862 が得られた。各直線の傾きに多少の違いはあるが、応力比に関係なく 1 本の直線で表示することができる。全てのデータを 1 本の直線で表示したものが、それぞれの図中に示した直線である。図 3-13 の直線の傾きは 0.812 (相関係数 0.902), 図 3-14 での傾きは 0.888 (相関係数 0.866) となった。条件により多少数値は乱れた

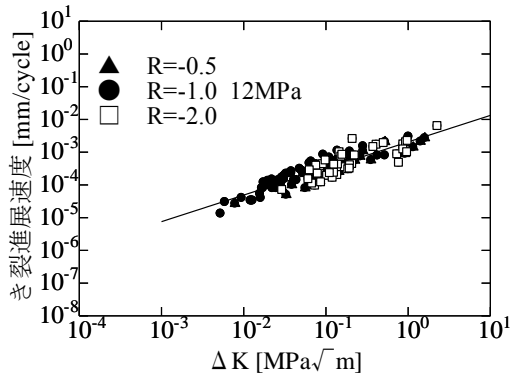


図 3-13 き裂進展速度と  $\Delta K$  の関係

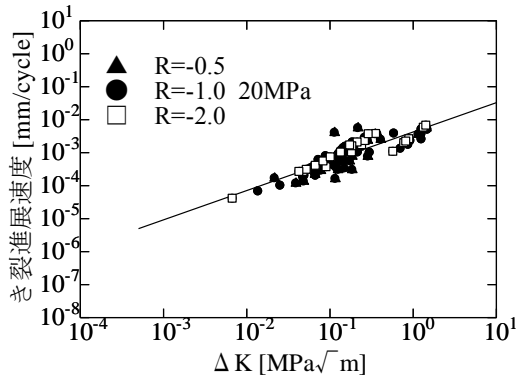


図 3-14 き裂進展速度と  $\Delta K$  の関係

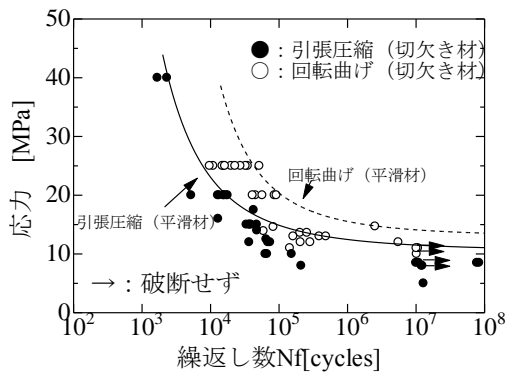


図 3-15 引張圧縮と片持ち回転曲げの S-N 曲線

が、この図から応力比に関係なく 1 本での直線での回帰には妥当性が認められる。つまり、応力比を変化させた場合でも PC の引張圧縮による疲れき裂の進展挙動は、 $\Delta K$  により整理することが可能であると考えられる。

3. 5 小穴材のき裂進展挙動

～片持ち回転曲げ疲れ試験法と比較した場合～

ここでは、片持ち回転曲げ疲れ試験<sup>(5),(6)</sup> との間にはどのような違いがあるかを比較・観察を行った。図 3-15 に引張圧縮疲れ試験 (●印) と片持ち回転曲げ疲れ試験 (○印) の

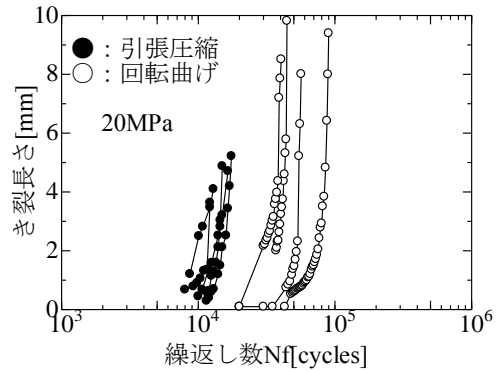


図 3-16 き裂長さとの繰返し数の関係

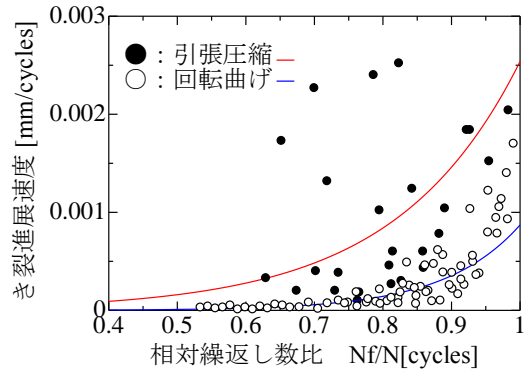


図 3-17 き裂進展速度と相対繰返し数比の関係

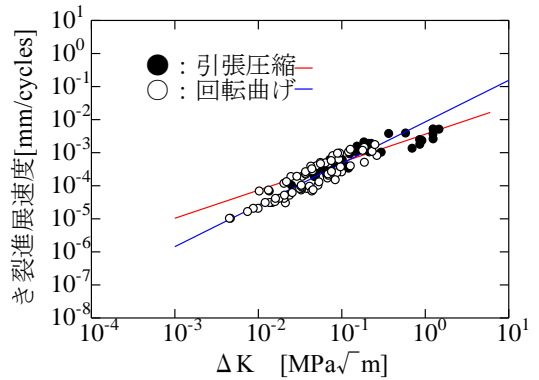


図 3-18 き裂進展速度と  $\Delta K$  の関係



S-N 曲線を示している。研究データから片持ち回転曲げの平滑材の疲れ限度は 14MPa、切欠き材では 11MPa であることがわかっている。引張圧縮疲れ試験法の平滑材の疲れ限度は 11MPa、切欠き材では 8.5MPa である。これらの結果から切欠き係数  $\beta$  は、片持ち回転曲げで 1.27、引張圧縮で 1.29 という値を得ることができる。切欠きを材料に与えると疲れ限度は小さくなるが、両試験は切欠き係数が同等の試験が実施できていることを理解できる。

次に、き裂の進展挙動について引張圧縮、片持ち回転曲げともに設定応力 20MPa で比較した。図 3-16 はき裂長さと繰返し数の関係であり、片持ち回転曲げは引張圧縮に比べて、き裂の長さが倍以上まで観察できている。これは、引張圧縮では断面内に一律の応力がかかるのに対し、片持ち回転曲げでは断面内に応力勾配があり、き裂が中央部まで成長するのに時間を要するため、表面き裂としては大きく成長したものと考えられる。

図 3-17 は、き裂進展速度と相対繰返し数比の関係である。同応力下 (20MPa) では引張圧縮の方がき裂進展速度が大きいことから、き裂に対し敏感であると考えられる。

表 3-1 PMMA の機械的性質

ヤング率 [GPa]	引張強さ [MPa]	耐力 $\sigma_{0.2}$ [MPa]	曲げ強さ [MPa]	伸び [%]	比重
3.2	68~70	41.0	90~100	5.0	1.19

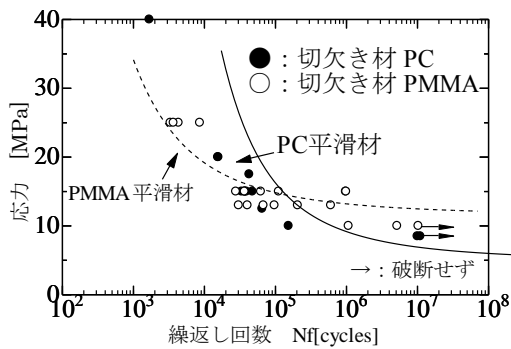


図 3-19 PC と PMMA の切欠き材の S-N 曲線

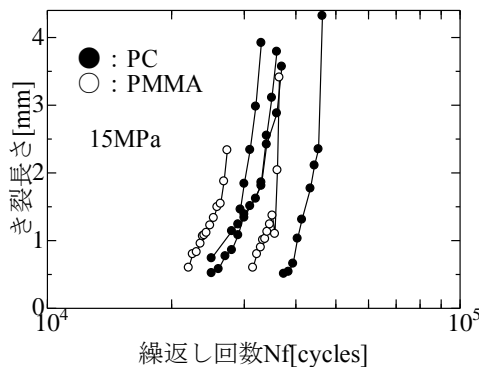


図 3-20 き裂長さと繰返し数の関係

図 3-18 は、き裂進展速度と  $\Delta K$  の関係で、引張圧縮と片持ち回転曲げの両者がパリス則に従うものとして直線回帰した。同応力下 (20MPa) にも拘らず、傾きは引張圧縮で 0.848 (相関係数 0.914)、片持ち回転曲げで 1.258 (相関係数 0.906) となり、試験片の個体差以上に両者には差異が認められた。これは、試験方法による違い、すなわち応力の掛かり方の違いが原因だと考えられる。

3. 6 小穴材のき裂進展挙動 ~PMMA と比較した場合~

PC の比較材料として、以前に実施した PMMA<sup>7)</sup> の疲れ試験と比較・検討を行う。試験片は同じ形状・寸法で、試験方法はともに引張圧縮疲れ試験である。PMMA の機械的性質は表 3-1 に示した通りで、両材料の一番の違いは伸びであり、PC は延性的性質、PMMA はぜい性的性質を示す材料であることがわかる。

図 3-19 は、両材料の切欠き材で得られた S-N 曲線で、平滑材の結果は回帰曲線で示した。PMMA 平滑材の疲れ限度は約 12MPa、切欠き材の疲れ限度は約 10MPa であったので、切欠き係数  $\beta$  は 1.2 となり、PC の切欠き係数 1.29 と同等である。PC は、大きい荷重に対して短期的に耐えるのであれば、延性により変位を出すことでぜい性より一部分にかかる応力 (負担) を少なくすることができる。荷重が大きいときは、その分変位 (変形) が大きくなるために破断が早まってしまうといえる。一方、PMMA は逆に縦弾性

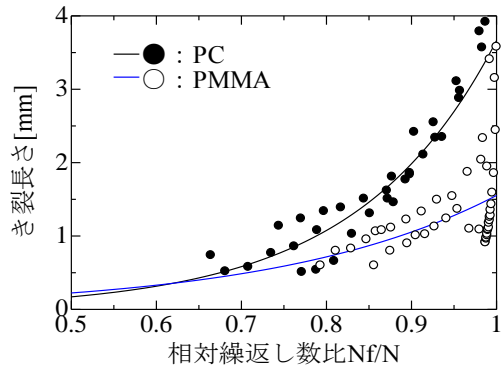


図 3-21 き裂長さと相対繰返し数比の関係

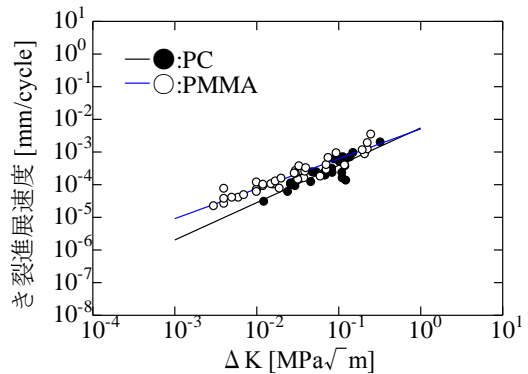


図 3-22 き裂進展速度と  $\Delta K$  の関係

係数が高く、小さい荷重に対しての変位量が少なく、疲労を蓄積しにくいと考えられる。しかし、大きい荷重になると、縦弾性係数が大きく、変位量が少ないために、荷重を逃がすことができず、すぐに破断してしまうといえる。

次に、き裂進展挙動について考察してみる。図 3-20 は、両材料の負荷応力 15MPa におけるき裂長さとお返し回数との関係であり、PC を●印、PMMA を○印で描いた。これによると、特徴的な違いは認められず、ばらつきは見られるが同様のき裂成長をしていることがわかる。

図 3-21 は、両材料のき裂長さとお返し回数比の関係であり、PC は PMMA と比較してき裂成長量が大きいことがわかる。また、き裂発生地点は PC の 0.65~0.7 に対して、PMMA は 0.8 付近となっている。すなわち、PMMA は PC よりき裂が発生しにくい、発生したき裂に対して敏感で、き裂伝播寿命が短いことが伺える。

図 3-22 は、両材料のき裂進展速度と  $\Delta K$  の関係であり、PC の傾きは 1.143(相関係数 0.884)、PMMA の傾きは 0.916(相関係数 0.954) という値を求められた。この結果によると、両材料には延性とぜい性の大きな性質の違いはあるものの、 $\Delta K$  の整理には類似性が認められ、試験条件が同じであれば同様のき裂進展挙動を示す可能性が伺える。この点については、比較応力レベルの点数を増やし、試験条件の違いによる影響も詳細に比較・検討する必要がある。

#### 4. 結 言

今回、非晶性で透明性に優れた PC を試験材料として、疲れ限度にそれほど影響を与えず、き裂の発生起点として有効な微小ドリル穴加工を施した切欠き材を用いて、引張・圧縮疲れ試験を実施した。これにより得られたき裂の進展挙動の研究結果を以下に示す。

1. PC 切欠き材の微小ドリル穴として直径を 0.15mm、深さを 0.20mm とした際の疲れ限度は 8.5MPa、PC 平滑材の疲れ限度は 11MPa であった。切欠き係数  $\beta$  は 1.29 が得られ、微小ドリル穴加工によるこの程度の切欠きは、疲れ寿命に与える影響は比較的小さい。また、この切欠きは、き裂発生起点として有効であった。
2. き裂の進展挙動は、高応力では巨視的き裂成長は疲れ寿命の半ばから始まるのに対して、低応力では疲れ寿命の後半からき裂が成長し始め、破断に近づくとき急速にき裂成長することがわかった。また、高応力になるとき裂進展速度が大きくなる傾向があり、応力依存性が認められた。
3. 応力比を変化させることにより、疲れ寿命ならびに疲れ限度に影響を与えることが判明した。しかし、き裂の発生、成長過程を観察した結果、き裂進展挙動に大きな変化は見られなかった。

4. き裂進展速度と応力拡大係数変化幅を両対数でグラフに取ると、各応力、応力比において直線で近似することができ、比例関係にあることがわかった。多少のばらつきはあるが応力、応力比に関係なく 1 本の直線で回帰ができることから PC の引張圧縮疲れ試験法による疲れき裂の進展挙動は、 $\Delta K$  により整理できるものと考えられる。
5. 片持ち回転曲げでは断面内の応力勾配により、同応力でも負担が小さいため、引張圧縮よりも疲れ限度が高く、寿命も長い。また、き裂の成長の仕方は引張圧縮と酷似している。パリス則に従うものとして直線での回帰を行ったが、試験片の個体差以上に試験方法による違いが大きい結果が得られた。
6. 比較材料として PMMA の試験結果を検討したところ、寿命およびき裂進展挙動においては延性材料とぜい性材料の違い、き裂に対する敏感性の違いが明瞭に伺えた。一方、 $\Delta K$  による整理では類似性も認められ、今後詳細な比較・検討が必要である。

#### 参考文献

- (1) 例えば 福井 博之：プラスチックス, 1 月号, (2009), p69, 工業調査会.
- (2) 村上 理一, 金 允海, 楠川 量啓：材料の強度と破壊の基礎, (2005), pp74~77・83・84, ふくろう出版.
- (3) 成澤 郁夫；プラスチックの機械的性質, (1994), pp185・186・190~192, シグマ出版.
- (4) 内田 武・大和 政弘；PMMA および PC 平滑材の引張・圧縮疲労挙動, 北九州工業高等専門学校研究報告, No.42, (2009), pp.9-15.
- (5) 内田 武・坂本 洋；PMMA および PC 平滑材の片持ち回転曲げ疲労挙動, 北九州工業高等専門学校研究報告, No.40, (2007), pp.7-14.
- (6) 内田 武・大和 政弘；PC 切欠き材の片持ち回転曲げ疲労挙動, 北九州工業高等専門学校研究報告, No.43, (2010), pp.15-20.
- (7) 内田 武・山内 康平；PMMA の引張・圧縮疲労挙動に関する研究 (第 2 報：切欠き材の疲労寿命およびき裂進展挙動), 北九州工業高等専門学校研究報告, No.35, (2002), pp.19-25.

(2010 年 10 月 15 日 受理)