

PMMA および PC 平滑材の引張・圧縮疲労挙動

内田 武* ・ 大和 政弘**

Tension-compression Fatigue Behavior of PMMA and PC Smooth Specimen

Takeshi UCHIDA* and Masahiro YAMATO**

The tension-compression fatigue tests of smooth PMMA(Polymethylmethacrylate) and PC(Polycarbonate) specimen were carried out under the stress ranging from 6 to 40MPa at the room temperature. The repeat rate of load are set ranging from 2 to 60Hz and the stress ratio are set -0.5, -1 and -2. The fatigue behavior about fatigue life, fatigue limit, stress ratio and macro-fractography on the fracture surface were investigated. The experimental results are as follows. (1) In the case of stress ratio -1, the fatigue limit of PMMA and PC is approximately 12MPa and 11MPa, respectively. With both materials, there is not an effect to fatigue life to repeat rate 40Hz either. The fatigue life of PC was longer than that of PMMA under most stress range. (2) In the case of repeat rate 20Hz, PMMA is affected by the stress ratio, but PC does not catch most of the effects. As for the PMMA, it seems to be affected crack growth in a load process of compression. (3) The morphology of the fracture surface of PMMA and PC are classified into three large regions. The area ratio of mirror area, which can be thought that fatigue crack propagated on the fatigue surface, depend on the stress level. The mirror area ratio of PC was bigger than that of PMMA under the high stress range.

Key Word : Plastics, PMMA, PC, Tension-compression fatigue, Smooth specimen, Fatigue life, Fatigue limit
Effect of repeat rate, Effect of stress ratio, Macrofractography

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⁽¹⁾、その性質の向上が要求されるのは必至である。

プラスチックという材料は、もともと自然界に存在しないため環境に与える負荷が大きく、このため廃棄処理・リサイクルの面で常に問題になっている。しかし、プラスチック材料が今日のようにあらゆる分野で使用・開発されているのは、低比重であり成形性、着色性がよいなどの多くの特徴を持ち、また複合化、新機能付加が他の材料に比べて比較的簡単であり、要求が多様化している現在、この材料が持つ可能性と期待が大きいからである。

日本におけるプラスチックの使用量は、身の回りに多く使われていることから理解されるように、年々増えつづ

けている。オイルショックを契機として、重厚長大から軽薄短小化が促進され、生活様式の変化による電話器・カメラ・パソコンなどの電子機器の携帯用商品の需要増加などにより、プラスチックが大いに活躍している。

プラスチック材料そのものは、歴史的に見ても新材料とは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についての研究においては、多くの研究者が関わっている。一方で、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積極的に使用することを考えた際には、強度や耐久性について心配が残る。そのため、プラスチック材料の強度的特性の評価、特に疲労挙動に関しては検討の必要が多分に残されている。

本研究は、光透過性の高い材料について、引張・圧縮による負荷の繰返しに対する疲労寿命、破断面形態などに関した系統的な実験的研究^{(2),(3)}を通して、負荷の繰返し速度・応力比（平均応力）などの影響を調査するものである。試験に使用した材料は、ぜい性的性質を示す代表的な非晶性汎用プラスチックのポリメチルメタクリレート（Polymethylmethacrylate：以下、PMMA）ならびに延性的性質を示す代表的な非晶性エンジニアリングプラスチックのポリカーボネート（Polycarbonate：以下、PC）の2種類である。これらの材料は、透明度が非常に高く、耐候性や機械的性質に優れ、硬度が高いことから、主にガラスの代替材料として用いられている。

本報告では、これまでに実施したPMMAおよびPCの引張・圧縮疲労試験、疲労寿命に与える繰返し速度の影響、疲労寿命に与える応力比（平均応力）の影響ならびに、巨視的破断面解析から得られた結果を示す。

* 機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

** 専攻科, 生産工学専攻1年

(Advanced Production Engineering Course, 1st grade)

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 PMMA (三菱レイヨン(株)製, 商品名: アクリロッド) および PC (原料: 帝人化成(株), 加工: ティヨー(株)) であり, 表 1 および表 2 にそれぞれの機械的性質^{(4)~(6)}, 図 1 に引張・圧縮疲労試験片の形状・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, 透明であるためにき裂の進展挙動が肉眼で確認できる可能性があるためである。比較対照の 2 種類として PMMA と PC を用いたのは, 性質的に非常に良く似たところが多く, ぜい性材料か延性材料かという点が決定的に異なるために, 性質の違いと疲労挙動の比較が検討しやすいと判断したからである。

両試験片は, 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を適宜選定して注意深く研磨し, 最終研磨に 0.5 μm のアルミナ水溶液を用いて, 完全透明に仕上げた。旋削加工ならびに研磨作業によって試験片表面に生じた残留応力が疲労試験結果に影響すると考えられるので, 透明仕上げ後に焼きなまし処理を行って残留応力を取り除いた。

焼きなましの処理温度を決定するために, それぞれの材料についての粘弾性測定^{(3),(6)} と予備熱処理の結果より, 急激な性質変化を伴う温度 (PMMA は 104.2°C 付近, PC は 142.6°C 付近), ガラス転移温度 (PMMA は約 90°C, PC は約 141°C), 試料の熱変形温度 (PMMA は約 83.2°C, PC は約 136°C) をもとにして, 図 2 に示した熱処理を施した。即ち, PMMA については, 100°C/hr の昇温速度で 83°C (356K) まで加熱し, 10 時間保持後, -10°C/hr の降温速度で室温まで炉内で徐冷した。PC については, 100°C/hr の昇温速度で 128°C (401K) まで加熱し, 10 時間保持後, -10°C/hr の降温速度で室温まで炉内で徐冷した。

表 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

表 2 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

2.2 試験方法

疲労試験は, 可搬形疲労試験機 (カヤバ工業(株)製 HTM30-200-05, 容量 30kN) を用いて, 温度 23°C にて荷重制御により実施した。応力比 $R=-1$ の完全両振りにおいては, PMMA では繰返し速度 2・5・20・40・60Hz で最大引張応力 (振幅応力) を 9~30MPa ($\sigma/\sigma_{0.2}=0.22\sim0.73$), PC では繰返し速度 10・20・40Hz で最大引張応力 (振幅応力) を 10~40MPa ($\sigma/\sigma_{0.2}=0.15\sim0.61$) で適宜変化させた。応力比 $R=-0.5\sim-2$ の部分両振りにおいては, 繰返し速度を 20Hz に固定しており, 最大引張応力を PMMA では 11~30MPa ($\sigma/\sigma_{0.2}=0.27\sim0.73$), PC では 6~30MPa ($\sigma/\sigma_{0.2}=0.09\sim0.46$) で適宜変化させた。

破断面解析に当っては, 巨視的観察とともに, 破断面をビデオルーペ (スカラ株式会社製, VL-11S/SL) を用いてパソコンに画像として取り込み, ソフトウェアによる画像解析により, 最終破断に移行する直前までの領域の面積を測定し, その面積の破断面全体に対する割合を評価した。なお, この評価に当っては, ビデオルーペによって捕えた破断面画像をもとに, 破断面全体ならびに対象領域の面積に対応する画素数 (ピクセル数) を計数しているが, この手法による処理が有効である⁽⁹⁾ ことは確認済みである。

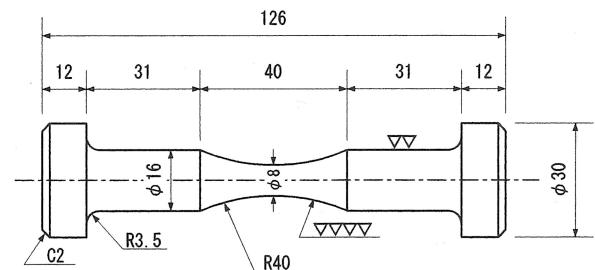


図 1 引張・圧縮疲労試験片の形状・寸法

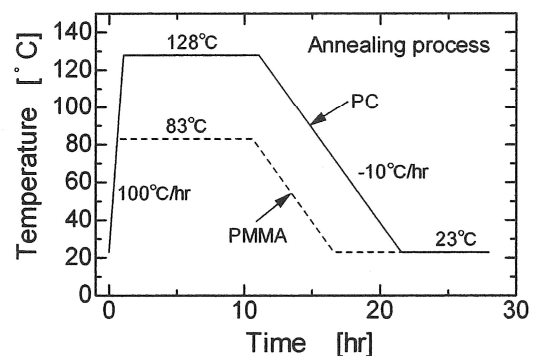


図 2 PMMA と PC 疲労試験片の熱処理工程

3. 試験結果および考察

3. 1 負荷応力および繰返し速度と寿命の関係

図3と図4は、それぞれPMMAとPCを対象にした、完全両振り(応力比 $R=-1$)での引張・圧縮疲労試験の振幅応力と繰返し数の関係(S-N曲線)を繰返し速度で記号を変えて記している。図3の中塗りならびに図4の矢印を付した試験片は、 10^7 回以上の負荷の繰返しでも破断しなかったために試験を中止したもので、図中の曲線は繰返し速度20Hzのデータについて曲線回帰したものである。

図3より、PMMAの引張・圧縮疲労試験においては、繰返し速度が40Hzまではその影響がほとんどなく疲労限度は12MPa程度であるが、60Hzでは繰返し速度の影響が現れ疲労限度は9MPa程度に低下している。また、高振幅応力では60Hzの寿命は他の繰返し速度の場合と同程度であるのに対し、低振幅応力になると他の繰返し速度の場合より寿命低下が顕著である。

繰返し速度の違いによって疲労限度が低下する要因の一つには、破断部分の温度が考えられる。即ち、引張・圧縮

時に受けた仕事の一部は熱に変わるが、粘弾性体であるプラスチック材料は繰返し速度が速い程その蓄熱量が増すこと、一般に熱伝導性が良くないことなどにより試験片の局部温度はかなり上昇するはずである。一般に、温度が高くなるとクリープ歪が大きくなるので早く破断に至る。そのため、繰返し速度が速いほど局部温度が高くなり、疲労限度が低下したものと考えられる。

一方、20MPa程度以上の振幅応力では繰返し速度の影響があまり見られないが、負荷応力が高い場合には試験片の局部温度変化の影響よりも負荷応力そのものによる影響が大きくなるための結果だと判断される。これについては、疲労過程での温度変化を調査することで、明確にさせて行きたい。

PCの引張・圧縮疲労試験においては、先程の事情により繰返し速度60Hzの試験は実施していないが、図4より繰返し速度に関わりなく疲労寿命は11MPa程度であり、PMMAの結果と同様に繰返し速度が40Hz程度まではその影響がほとんどないことがわかる。また、PMMAの結果と同様に、負荷応力が高い程、寿命のバラツキが少ない。

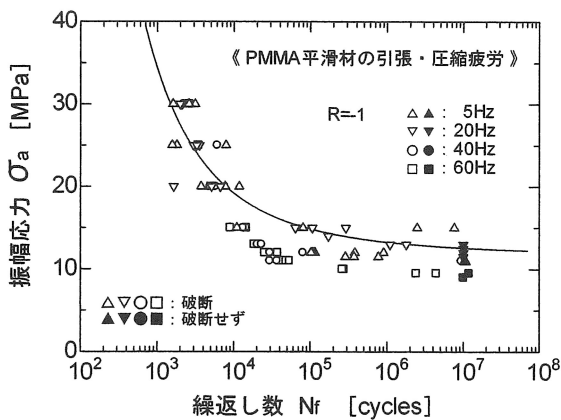


図3 PMMA 平滑材の S-N 曲線 ($R=-1$)

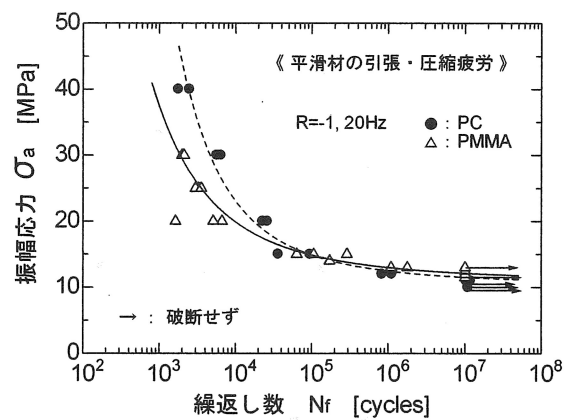


図5 PMMAとPC 平滑材の S-N 曲線 ($R=-1, 20\text{Hz}$)

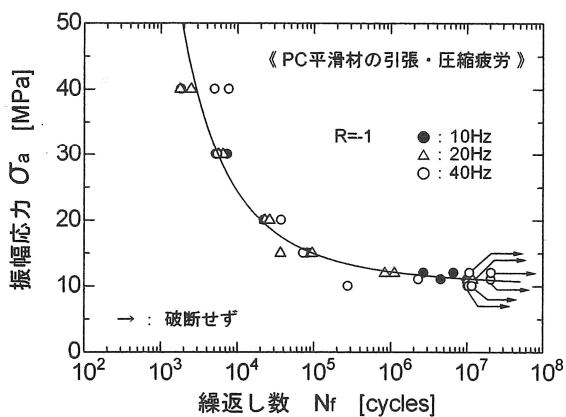


図4 PC 平滑材の S-N 曲線 ($R=-1$)

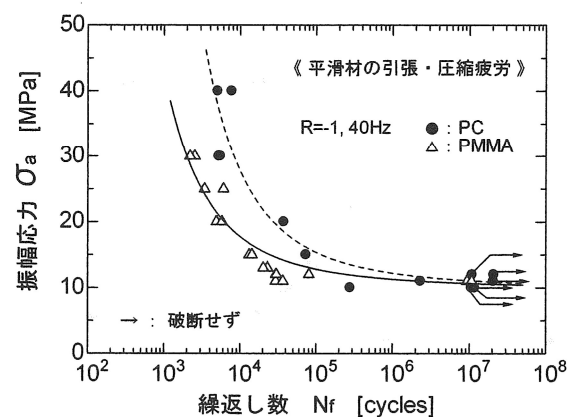


図6 PMMAとPC 平滑材の S-N 曲線 ($R=-1, 40\text{Hz}$)

図5および図6は、それぞれ繰返し速度20Hzと40Hzを対象にした、完全両振り(応力比 $R=-1$)での引張・圧縮疲労試験の振幅応力と繰返し数の関係(S-N曲線)で、材料の違いで記号を変えて記している。これによると、PMMAとPCの疲労限度はあまり変わらず11~12MPaであるが、ほとんどの応力域でPCの方がPMMAよりも長寿命であることがわかる。この傾向は、先報^{(7),(8)}で報告した片持ち回転曲げ疲労試験の結果と類似している。

PMMAとPCの性質の基本的な違いには、延性的性格の有無があるために、このことが要因の一つとも考えられる。また、延性材料であるPCはき裂が比較的ゆっくりと進展して破断に至り、ぜい性材料のPMMAより粘り強い(応力に鈍感)ために、高応力域でPCの方が長寿命になったものとも考えられる。ところが、低応力域ではPMMAの方が長寿命の傾向も認められ、このような現象の理由としては、繰返し軟化や繰返し硬化も考慮する必要がある。元来、PMMAは応力感受性が高いことも考えられるため、今後き裂進展挙動を詳細に調査する必要がある。

3.2 応力比(平均応力)と寿命の関係

図7と図8は、それぞれPMMAとPCを対象にした、負荷の繰返し速度20Hzでの引張・圧縮疲労試験の最大引張応力と繰返し数の関係(S-N曲線)を応力比Rで記号を変えて記している。矢印を付した試験片は、 10^7 回以上の負荷の繰返しでも破断しなかったために試験を中止したもので、図中の曲線は $R=-1$ (完全両振り)のデータについて曲線回帰したものである。

最大引張応力で整理した結果によると、PMMAは疲労寿命が応力比Rの影響を受けること、疲労限度も応力比Rの影響を受けることがわかる。これに対し、PCは疲労寿命・疲労限度ともに応力比Rの影響をほとんど受けないことがわかる。最大引張応力が一定の場合には、応力比 $R=-0.5$ ・ -1 ・ -2 の順に圧縮応力が大きくなっているため、PMMAの場合は圧縮の負荷(き裂の閉口過程中)もき裂成長に影響を与え、結果として疲労寿命の低下・疲労限度の低下に現れたものと考えられる。PCの場合は、圧縮の負荷による影響はほとんど現れていない。これらの結果に対しては、今後両材料の機械的性質を踏まえ、疲労過程中のき裂進展

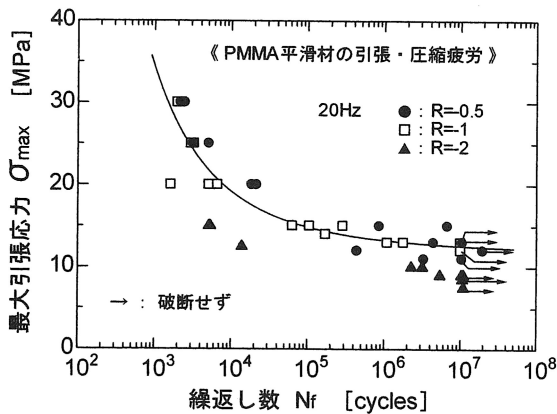


図7 PMMA 平滑材の S-N 曲線 (20Hz, 最大応力)

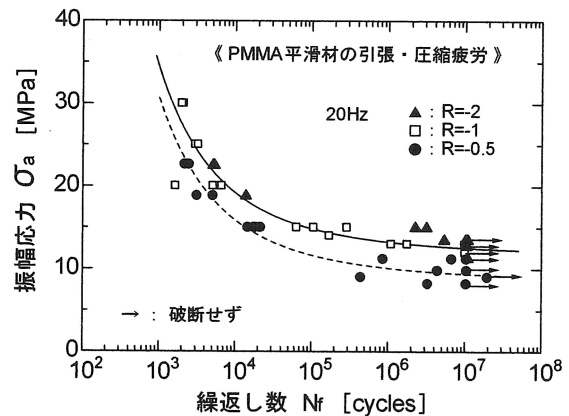


図9 PMMA 平滑材の S-N 曲線 (20Hz, 振幅応力)

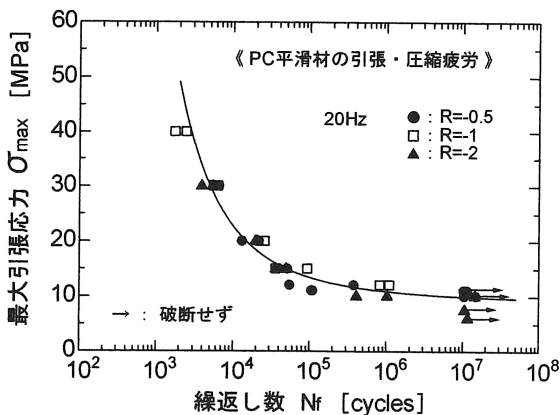


図8 PC 平滑材の S-N 曲線 (20Hz, 最大応力)

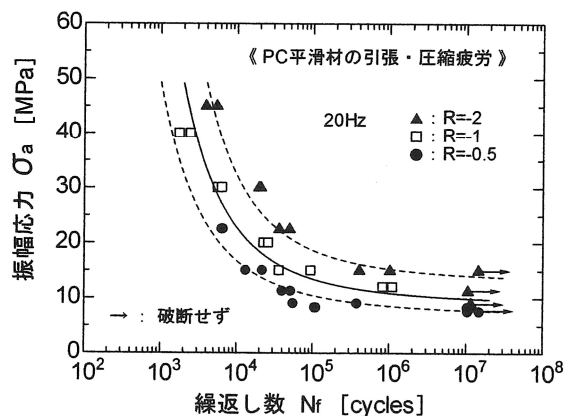


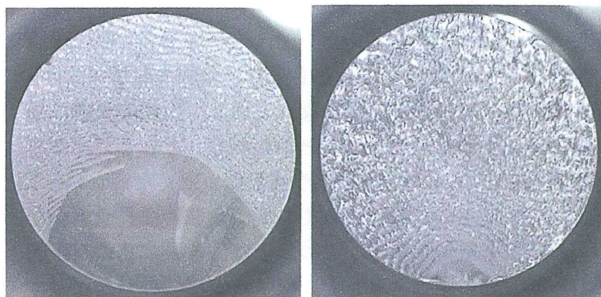
図10 PC 平滑材の S-N 曲線 (20Hz, 振幅応力)

挙動を調査の上で、慎重に検討する必要がある。

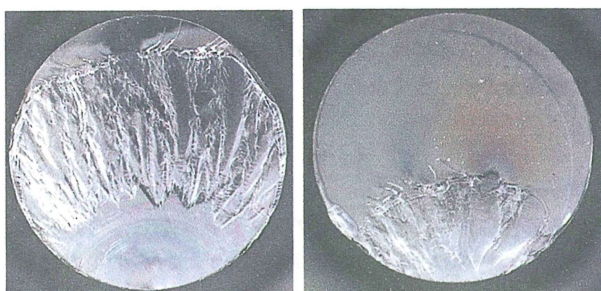
図9と図10は、PMMAとPCにおける先述の結果を振幅応力について再整理したもので、図中の実線は $R=-1$ (完全両振り)、破線はそれ以外のデータについて曲線回帰したものである。これによると、引張の負荷の方が圧縮の負荷よりも疲労寿命に与える影響が大きいことを判断することができる。また、PMMAは応力比 $R=-0.5 \cdot -1 \cdot -2$ の順に疲労寿命が長くなっているが、応力比 $R=-1$ と $R=-2$ の差はそれ程ないようである。これは、先述のようにPMMAの場合は圧縮の負荷も疲労寿命への影響因子である現れとも考えられる。PCの場合は、圧縮の負荷による影響はほとんどないためか、応力比 $R=-0.5 \cdot -1 \cdot -2$ の順で明確に疲労寿命が長くなっている。

3.3 破断面解析

図11と図12は、それぞれPMMAとPCの平滑材を対象にした、引張・圧縮疲労試験で得られた代表的な破断面の例であるが、形態上の明確な差異は認められなかったので、いずれも応力比 $R=-1$ (完全両振り) の例を示している。図11はPMMAで、図(a)に繰返し速度 20Hz・設定負荷応力 15MPa、図(b)に 20Hz・30MPaの破断面例、図12はPCで、図(a)に繰返し速度 40Hz・設定負荷応力 11MPa、図(b)に 40Hz・20MPaの破断面例である。今回実施した試験条件においては、全てほぼ類似した破断面形態を呈しており、試



(a) 20Hz・15MPa (b) 20Hz・30MPa
図11 PMMA平滑材の代表的な破断面 ($R=-1$)



(c) 40Hz・11MPa (d) 40Hz・20MPa
図12 PC平滑材の代表的な破断面 ($R=-1$)

験片の長手方向に対してほぼ垂直な面で破断していた。これらの破断面は、図11・図12でもわかるように、両材料とも明確に識別できる領域として3つの領域に分類することができた。即ち、PMMAでは先報^{(2),(3),(7),(8)}で詳述したように、湾曲部最小断面の表面から発生したき裂が比較的ゆっくりと進行し、き裂先端が円弧状をなして広がった非常に滑らかな領域(領域I、鏡面領域)、破面性状が非常に粗い領域(領域III、最終破断領域)ならびにそれらの中間領域(領域II)の3領域である。PCではき裂先端が円弧状をなして広がった非常に滑らかな領域(領域I、鏡面領域)、破面性状が非常に粗い放射状条痕のある領域(領域II、中間領域)ならびにその後広がる滑らかな領域(領域III、最終破断領域)の3領域である。領域Iには、ストライエーションが存在⁽²⁾しているものと考えられるが、今回はその確認までは至っていない。PCの場合に、領域Iから領域IIへ移行する間にも、比較的滑らかな部分を含むものも多かったが、その領域の先端部が識別しにくいことが多いため、今回はこの領域は観察対象に入れていない。

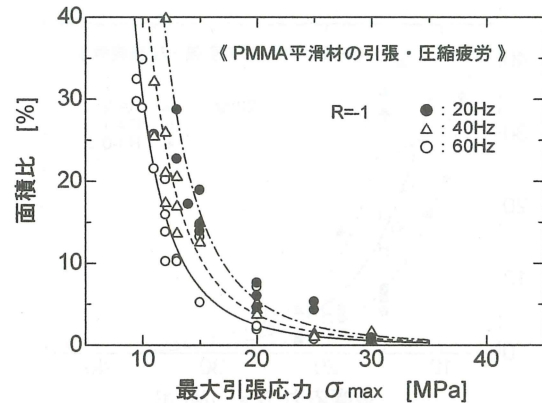


図13 PMMA平滑材の面積比 ($R=-1$)

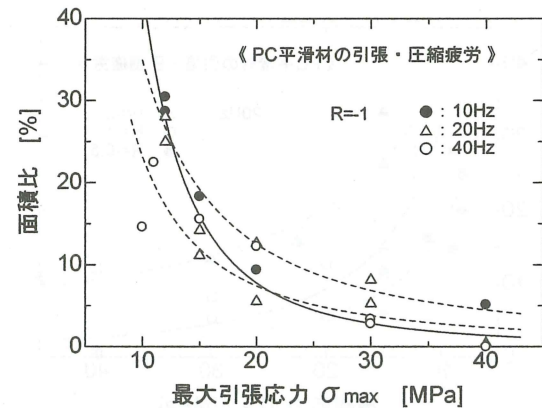


図14 PC平滑材の面積比 ($R=-1$)

巨視的に見た破断面観察の結果、これまでと同様に高応力で鏡面領域（領域Ⅰ）は少なくなり、低応力で鏡面領域が多くなる傾向にあった。そこで、今回もこの鏡面領域（領域Ⅰ）が破断面全体に占める割合に注目し、負荷応力ならびに応力比 R による影響を調査した。

図 13 と図 14 は、それぞれ PMMA と PC を対象にした、完全両振り（応力比 $R=-1$ ）での引張・圧縮疲労試験の破断面について、鏡面領域（領域Ⅰ）の面積比と最大引張応力（振幅応力に等価）の関係を繰返し速度で記号を変えて記している。図中の曲線は、各繰返し速度のデータによる回帰曲線である。

これによると、どの繰返し速度においても、高負荷応力域ではき裂が発生してからの破断が早いいためか、破断面全体に占める鏡面領域の割合が低い。一方で、低応力域ではき裂がゆっくりと進むためか、破断面全体に占める鏡面領域の割合が高い。き裂は、負荷の繰返しによって、試験片湾曲部底いわゆる最小断面の表面から発生し、鏡面領域（領

域Ⅰ）を形成しながらゆっくりと広がりながら成長し（領域Ⅱ）、その後一気に破断（領域Ⅲ）に至る。このことから、試験片に作用する負荷が高い程、一気に破断する領域Ⅲの割合が大きく、逆に負荷が低ければき裂先端での無理の程度が小さいために、ある程度のき裂成長を伴うことになり、結果として領域Ⅰの割合が高くなる。

また、図 13 と図 14 からわかるように、繰返し速度の違いによる鏡面領域の面積比にはいくらかの影響が認められ、特に PMMA の低応力域で顕著に現れている。さらに、同じ繰返し速度における鏡面領域の面積比は、疲労限度に近い低応力域では PMMA と PC は同程度であるのに対して、中・高応力域では明らかに PMMA より PC の方が高くなっていることがわかる。PC は延性材料であるから、き裂先端での変形能が高いことで粘って破断するとの仮定とともに、前述したように PMMA が応力感受性が高いことを想定すると、どの応力域でも PC での鏡面領域の面積比が PMMA よりも高くなると考えられるが、今回の結果においては低応力域での現象が若干異なっていた。

図 15 と図 16 は、PMMA と PC における鏡面領域（領域Ⅰ）の面積比と振幅応力の関係を応力比の違いで記号を変えて描いたもので、曲線は各応力比のデータによる回帰曲線である。これによると、両材料ともに応力比が変化しても、高応力になるにつれて鏡面領域の面積比は低下する傾向が認められるが、高応力域での面積比は PC の方が高い傾向がある。

また、別の角度から考察すると、同じ振幅応力においては応力比 R の値が $-2 \cdot -1 \cdot -0.5$ の順に引張の負荷が大きくなる。（逆に言えば、応力比 $-0.5 \cdot -1 \cdot -2$ の順に圧縮の負荷が大きくなる。）このことより、引張の負荷が大きい程鏡面領域の面積比が小さくなっており、引張の負荷は面積比に及ぼす影響が大きいことがわかる。ところが、高応力域では PMMA の方が PC より面積比が低くなるということは、同じ引張の負荷であっても鏡面領域の成長量が少ないということに対応する。このことは、き裂成長の支配因子（き裂先端の鋭しさとしての因子）が引張の負荷だけではなく、圧縮の負荷による影響が大きいためによりゆっくりとしたき裂成長期間が短く、領域Ⅱ・Ⅲへの移行が早くなり寿命へも影響するものと予想される。但し、この問題に関しては、PMMA と PC の機械的性質の違い、クレイズの存在とその大きさ、き裂先端の無理の程度を評価した上で面積比を議論する必要性、微視的な破断面評価、き裂成長の連続観察などが必要である。

4. 結 言

光透過性に富み非晶性汎用プラスチックから、ぜい性的性質を示す PMMA および延性的性質を示す PC の平滑材を用いた、引張・圧縮疲労試験を室温環境下で実施した。応力比 $R=-1$ の完全両振りでは繰返し速度を $2 \sim 60\text{Hz}$ 、最大引張応力を $9 \sim 40\text{MPa}$ で変化させ、応力比 $R=-0.5 \cdot -2$ の

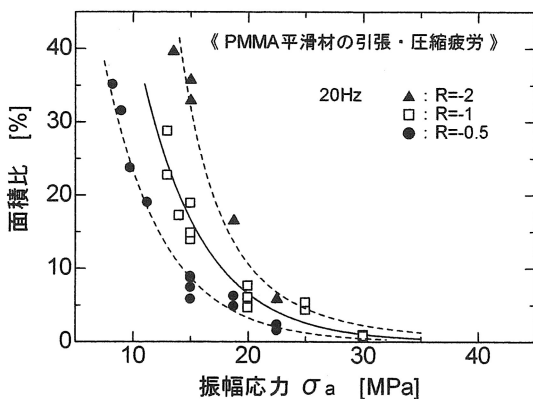


図 15 PMMA 平滑材の面積比 (20Hz)

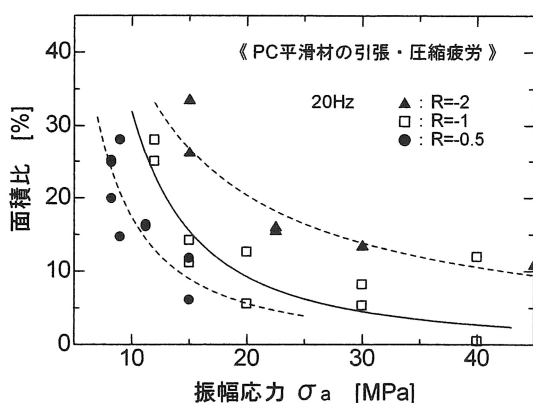


図 16 PC 平滑材の面積比 (20Hz)

部分両振りでは繰返し速度を20Hzに固定し、最大引張応力を6~30MPaで変化させた。これにより、疲労寿命に与える繰返し速度および応力比の影響ならびに、巨視的破断面形態を調査した。以下に、その結果を示す。

1. 応力比 $R=-1$ の完全両振りにおいて、PMMA 平滑材の疲労限度は約12MPa・PC 平滑材の疲労限度は約11MPaと同程度であり、繰返し速度が40Hz程度までは両平滑材とも疲労寿命へ与える影響は見られなかった。
2. 応力比 $R=-1$ ・繰返し速度60HzでのPMMA 平滑材の疲労寿命は、高応力域では40Hz以下の結果と同程度であるが、低応力になる程寿命が短い傾向にあり、疲労限度は約9MPaであった。
3. 応力比 $R=-1$ ・繰返し速度20・40Hzの同条件下での疲労寿命は、ほとんどの応力域でPCの方がPMMAよりも長寿命であった。
4. 繰返し速度20Hzにおいて、最大引張応力で見るとPMMAは応力比の影響を受けるが、PCは影響をほとんど受けない。振幅応力で整理した結果と併せて判断すると、PMMAは圧縮の負荷過程においてもき裂成長に影響を与えているようである。
5. PMMA・PCの疲労破断面形態を巨視的に観察したところ、材質の違いで形態上の特徴の差異はあるものの、領域Ⅰ（鏡面領域）・領域Ⅱ（中間領域）・領域Ⅲ（最終破断領域）の3つの領域に大きく分類される。
6. PC・PMMAの両平滑材とも、領域Ⅰ（鏡面領域）の面積比は負荷応力による影響が大きい。また、面積比は低応力域ではPMMAとPCは同程度であるのに対し、中・高応力域ではPCの方が大きい傾向にあった。

参考文献

- (1) 例えば 高野 菊雄；プラスチックス，4月号，(1997)，P10~15，工業調査会。
- (2) 内田 武・溝口 将弘；PMMAの引張・圧縮疲労挙動に関する研究（第1報：平滑材の疲労寿命および破断面解析），北九州工業高等専門学校研究報告，No.32，(1999)，pp.13-18。
- (3) 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。
- (4) 内田 武・江藤 友昭；ポリメチルメタクリレート（PMMA）の破壊強度に及ぼす負荷速度の影響，北九州工業高等専門学校研究報告，No.31，(1998)，pp.15-22。
- (5) 内田 武・池田 哲朗；PMMAの破壊じん性値およびき裂進展挙動に及ぼす変位速度の影響，北九州工業高等専門学校研究報告，No.33，(2000)，pp.17-27。
- (6) 内田 武・呉 奉春；PMMAならびにPCの破壊じん性値および破壊エネルギーに及ぼす変位速度の影響，北九州工業高等専門学校研究報告，No.35，(2002)，pp.9-18。
- (7) 内田 武・小西 雄一郎；PMMAの片持ち回転曲げによる疲労挙動に関する研究（第1報：平滑材の疲労寿命・表面温度・破断面形態），北九州工業高等専門学校研究報告，No.37，(2004)，pp.13-20。
- (8) 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。

(2008年10月10日 受理)