

Q

S-N 曲線の疲労寿命がばらつく要因は、亀裂発生ですか、それとも亀裂進展ですか。

参照 QNo.: FA-01, FA-15, FA-46

A

疲労寿命がばらつく要因は、亀裂発生が主で、亀裂進展は従である。

最初に、材料強度のばらつきの一般論を記す。同一材料の複数試験片を同一の条件で試験した場合、材料強度はばらつき(変動, 不確かさ)を示すことが知られている。一方向荷重の短時間負荷により得られる非時間依存形破壊の引張強さのばらつきは、延性破壊の場合に正規分布となり、標準偏差は小さい。

一方、繰返し荷重により生じる疲労破壊は時間依存形破壊であり、応力振幅(強度)と繰返し回数(寿命)の関係(S-N 曲線)として表示される。縦軸の強度の数値は 2 桁(100~1000MPa)異なるが、横軸の寿命の数値は 7 桁( $10^2$ ~ $10^8$  回)異なる。寿命は強度よりも桁違いに数値が大きいので、横軸は対数で表示される。したがって、S-N 曲線のばらつきも、特定の強度に対する寿命のばらつきとして、対数で表示される。結果からいうと、寿命のばらつきは対数正規分布となり、延性破壊の場合の引張強さと比較して、標準偏差は桁違いに大きい。

引張強さは、材料に固有な欠陥(組織の弱点)に支配される。これを、材料の組織感性(structure sensitive property)という。引張強さのばらつきは、組織感性の強弱により異なる。延性破壊と脆性破壊の例を、表 1 に示す。

延性破壊の場合、組織の弱点は介在物であり、多数の介在物を核として、微小空洞の成長と合体のメカニズムにより破壊する。この場合に、個々の組織の弱点は平均化され、組織感性は弱く、引張強さのばらつきは小さくなる。一方、脆性破壊の場合、破壊の起点は最も弱い組織の弱点(欠陥)に局所化され、起点からの亀裂進展という過程を示す。この場合に、組織感性は強く、引張強さのばらつきは大きくなる。

脆性破壊の場合には、欠陥寸法の確率分布が与えられれば、引張強さの確率分布が得られる。これを最弱リンク理論(weakest link theory)という。対数正規分布とワイブル分布が、その代表例である。実際に、脆性破壊の場合の引張強さのばらつきは、対数正規分布またはワイブル分布に従うことが知られている。

疲労破壊は、亀裂発生と亀裂進展という 2 つの過程で構成される時間依存形破壊である。したがって、疲労寿命は亀裂発生寿命と亀裂進展寿命の和である。疲労寿命のばらつきも、亀裂発生寿命のばらつきと亀裂進展寿命のばらつきの和となる。

疲労破壊の場合、亀裂発生の起点となる組織の弱点は材料表面に位置し、2 つの典型例がある。1 つは、すべりやすく方位した粗大結晶粒のすべり帯である。もう 1 つは、介在物である。低強度高延性材料の場合にはすべり帯が、高強度低延性材料の場合には介在物が、組織の弱点となる。

すべり帯が組織の弱点の場合、疲労寿命のばらつきと組織感性を、表 2 に示す。応力振幅の大小(疲労寿命の長短)により、組織感性の強弱は異なる。長疲労寿命の場合に、最弱の組織の

弱点が単一の亀裂発生の起点となり、組織敏感性は強い。したがって、亀裂発生寿命が疲労寿命に占める比率が高く、亀裂発生寿命のばらつきが疲労寿命のばらつきを律速する。これが、一般的な常識になっていると考えられる。しかし、応力振幅の増大に伴い、多くの組織の弱点が複数の亀裂発生の起点となり、組織敏感性は弱くなる。したがって、短疲労寿命の場合は、長疲労寿命の場合の常識に反する結果になる。

上記は、平滑試験片の結果である。切欠き試験片の場合には、切欠きによる応力集中の効果で、応力振幅の大小と関係なく、平滑試験片の短疲労寿命の場合と同じ結果が、さらに強調された形で得られる。

介在物が組織の弱点となる高強度低延性材料の場合は、欠陥が起点となる脆性破壊の場合と同じ結果になる。この場合に、組織敏感性は強く、疲労強度(または疲労寿命)のばらつきは大きくなる。

組織の弱点は、材料表面ばかりでなく、材料内部にもある。したがって、亀裂進展にも、組織の弱点が影響を及ぼす。しかし、影響の仕方は、両者でかなり異なる。

一般的な疲労破面は、最大引張応力方向に垂直な平面である。亀裂発生の起点は、この平面の自由表面に位置する。亀裂は起点を中心として放射状に進展し、亀裂前縁は半楕円形状となる。すなわち、疲労破面となる平面で組織の弱点を見た場合に、亀裂前縁には強弱の異なる組織の弱点が、常に分布している。

半楕円形状亀裂を、図1に示す。亀裂前縁において、組織の弱点の分布を反映して、局所的に亀裂進展速度が加速され、亀裂前縁に張り出しを形成する。

張り出した亀裂前縁の応力拡大係数は、亀裂深さ増分に伴い低下し、亀裂進展速度は減少して、局所的な張り出しの形成は終了する。一方、2つの隣接する張り出し間(リガメント)の亀裂前縁の応力拡大係数は、張り出しの亀裂深さ増分に伴い増大し、亀裂は急速に進展して、張り出しに追い付き、亀裂前縁は元の形状に回帰する。この局所的な張り出しと追い付きの繰返しにより、亀裂前縁が平均的な半楕円形状を維持しつつ、亀裂は進展する。

すなわち、亀裂前縁は点(先端)ではなく、線(前縁)であるが故に、個々の組織の弱点は平均化され、組織敏感性は弱くなる。したがって、亀裂進展速度のばらつきは小さく、その結果としての亀裂進展寿命のばらつきは、亀裂発生寿命のばらつきよりも小さい。

#### 〈補足1〉

半楕円形状亀裂が亀裂前縁に局所的な張り出しを形成した場合に、応力拡大係数の解析結果はない。直線状亀裂前縁の張り出しを半楕円形状亀裂でモデル化して、図2に示す。図2の(a)の場合が張り出しの初期形状、(b)の場合が張り出しの終期形成である。最深点(A)の応力拡大係数は、亀裂深さ増分に伴う楕円形状のアスペクト比の変化に起因して、減少する。

張り出しが隣接して形成される場合を、図3に示す。応力拡大係数が最大値を示す位置は、最深点(AとA')からリガメントの亀裂前縁(BとB')に移り、かつ相互干渉効果により、最大値は著しく増大する。

#### 〈補足2〉

上記の組織の分布は、亀裂前縁ばかりでなく、亀裂前方(亀裂進展方向)にも存在する。その結果、巨視的な亀裂進展方向を中央値として、微視的な亀裂進展方向は変化し、中央値からの逸脱と

回帰を繰り返す。具体的には、亀裂面に垂直な断面を見た場合に、亀裂はジグザグに進展する。また、破面を見た場合に、巨視的には平坦であるが、粒内ファセット、粒界ファセットなどの微視組織の痕跡が破面粗さを形成する。組織の弱点の影響がある場合を第Ⅱa 段階の亀裂進展過程、組織の弱点の影響が消失する場合を第Ⅱb 段階の亀裂進展過程という。第Ⅱa 段階と第Ⅱb 段階の亀裂進展過程は区別なく、同じ亀裂進展速度の式(例えば、Paris 式)で表示される、すなわち、組織の弱点の影響がある場合にも、亀裂進展速度のばらつきは小さい。

【参考文献】

(1) 小林英男, 材料の微視組織, 破壊機構と疲労亀裂成長抵抗, 日本機械学会誌, Vol.80, No.703, (1977), pp492-497.

表 1 引張強さのばらつきと組織敏感性

破壊の種類	引張強さ	ばらつき	延性	組織敏感性	破壊起点
延性破壊	低	小	高	弱	多
脆性破壊	高	大	低	強	少

表 2 疲労寿命のばらつきと組織敏感性

(すべり帯が組織の弱点の場合)

応力 振幅	疲労 寿命 $N_f$	ばらつき	亀裂発生寿命 $N_i$		組織 敏感性	亀裂発生 の起点
			寿命比 $N_i / N_f$	ばらつき		
小	長	大	大	大	強	少
大	短	小	小	小	弱	多

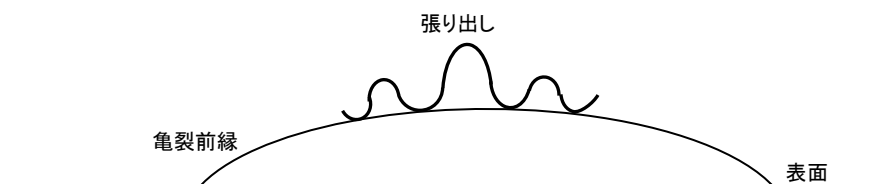
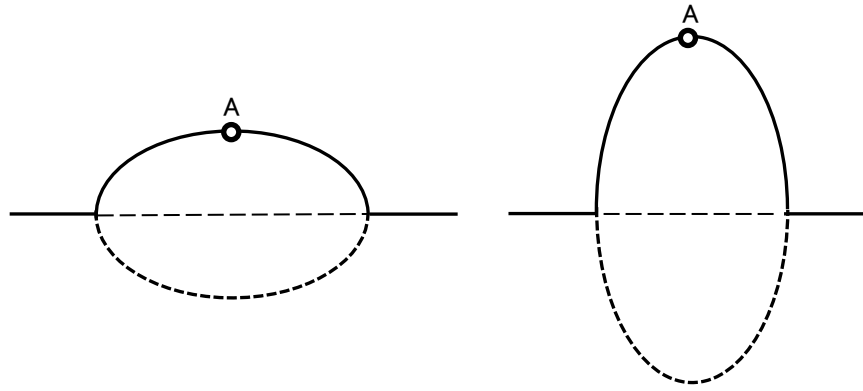


図 1 亀裂前縁の張り出しの形成



(a) 張り出しの初期形状

(b) 張り出しの終期形状

図 2 張り出しのモデル化(半楕円形状亀裂, 寸法は(a)<(b))

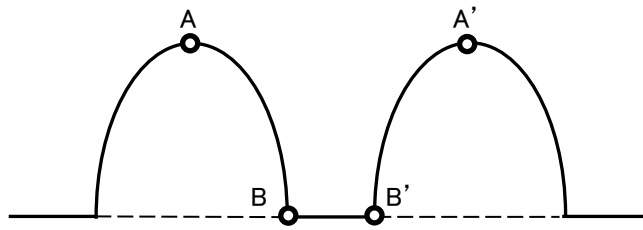


図 3 隣接する張り出しのモデル化