

機械・構造物の破損事故原因の多くを占める疲労破壊について、その分類は種々ある。疲労特性に影響する外部要因からみると、転動疲労やフレットング疲労といった相手部材との接触状態や、腐食疲労、高温・熱疲労および低温疲労といった環境因子がある。また、内部要因からみても、材料自体がもつ機械的・物理的・化学的性質および組織状態も疲労特性に大きく影響する。本稿では、環境因子として温度と腐食、内部要因として材料因子、表面粗さ、残留応力をとりあげ、その再現技術や評価技術について紹介する。



技術本部
機械・構造センター
機械技術部

もりやま ひでゆき
森脇 秀幸



技術本部
材料ソリューションセンター
腐食防食評価部

おかだ きよたか
岡田 聖貴



技術本部
材料ソリューションセンター
技術部

さとう かずみ
佐藤 和史

C-1 環境因子

1.1 高温環境

材料は高温になると強度が変化し、疲労強度および疲労寿命はその影響を受ける。低合金鋼を例にすると、融点に対しある一定の比率を超えた温度域ではクリープの影響がみられ、非弾性領域となる低サイクル疲労においては、ひずみ速度の低速化やひずみ保持時間の長期化により、疲労寿命は低下することが知られている。そのため、高温機器の疲労強度設計にあたっては、実機温度に合わせた疲労特性の評価が重要となる。ここでは、300℃を超える高温環境の再現技術について紹介する。

1.1.1 電気炉加熱

電熱線の発熱原理をもちいた赤外線による放射熱により、試験片を加熱する。当社保有の電気炉の1例を写真1に示す。実際の伝熱環境をみると単純ではない。その要因としては、電気炉の発熱源から放射される熱量分布の不均一性、発熱源と供試体表面と

の平行からのずれ、試験構成による伝熱面間の遮蔽物(治具など)がある。そのため、種々ある供試体形状および大きさに応じた電気炉サイズの選定と配置が必要となる。たとえば、一般的なサイズのバルク試験片よりも大幅に長い試験片をもちいる場合、標点距離内の均一な温度分布を確保するには、発熱源を複層化(写真1(b))し、各層で輻射熱量を制御する機構が有効となる。

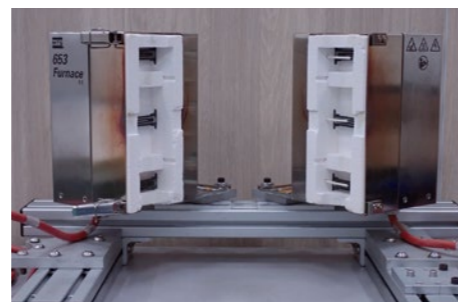
1.1.2 高周波電磁誘導加熱

金属体を入れたコイルに、交流電流を流すことで生じるヒステリシス損および渦電流損の加熱原理を利用した加熱手法となる。ここでは、当社の特徴ある熱サイクル疲労特性評価メニューを紹介する。評価対象は自動車の排気系において、エンジンの燃焼部に近く過酷な高温環境にさらされるエキゾーストマニホールドである。同部品は、材料変更によるコストダウンや、薄肉化により熱容量を低減し、後方に配置される触媒機能の最大化などが検討されており、耐酸化性、高温強度、熱疲労特性について評価されている。

写真1 電気炉外観



(a) 単層制御式



(b) 複層制御式

熱疲労特性について、当社では屈曲試験体をもちいた熱サイクル疲労試験により、1本の試験体でIn-phaseとOut-of-phase両モードを再現し、曲げ部に集中するひずみの数値解析による熱疲労強度評価手法を確立している。評価する材料としてはフェライト系ステンレス鋼が多い。この材料は、熱膨張係数がオーステナイト系ステンレス鋼にくらべ小さいことから、熱疲労特性の観点で多く採用されている。写真2にフェライト系ステンレス鋼の屈曲試験体の加熱状況を示す。評価部(き裂発生位置)となる屈曲頂点部の温度を800℃に合わせ、ASTM E606の要求事項にもとづく±1%以内の温度変動に維持しながら、熱疲労強度を評価している。ここで紹介した屈曲試験体に限らず、熱サイクル疲労試験において健全な疲労寿命を取得するには、評価部区間の均一な温度分布確保が重要であり、加熱原理からも、供試体のサイズ・形状に合わせた誘導コイルの巻き数、各コイルと供試体との距離を最適化する必要がある。

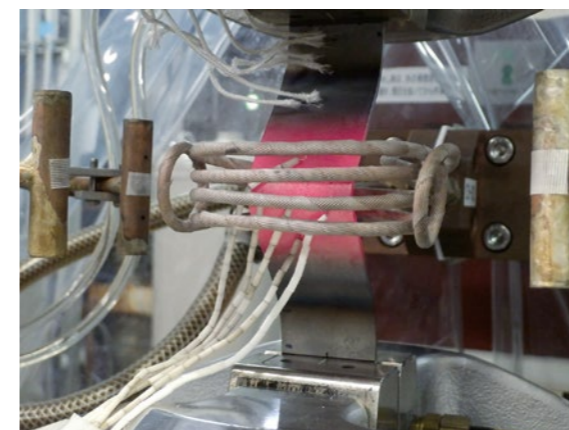
1.2 低温環境

材料の強度は一般的に温度低下とともに上昇するが、延性や靱性などは低下することが知られており、疲労寿命をみれば、疲労き裂発生限界と疲労き裂進展特性にも相当の影響を受けることが想定される。カーボンニュートラル実現に向けた水素利用技術をはじめ、超伝導応用技術や宇宙開発技術などにもちいられる構造材料には非常に厳しい低温特性が要求されており、低温環境における疲労特性評価の重要性は高い。ここでは、当社で保有する疲労試験機に搭載可能な低温環境装置(第1図)を概説する。

1.2.1 液体ヘリウム浸漬

液体ヘリウムが充填可能な冷却槽(第1図(a))となっており、4K環境での静的試験、破壊力学試験および疲労試験が可能となる。超高真空断熱の躯体と、ヘリウムガスを回収し再液化する機構を有している。また、槽内に設置されているターレットディスク形の試験片保持装置により、液体ヘリウム浸漬環境を維持した状態で試験片交換が可能であり、最大10本の連続試験が可能となっている。

写真2 屈曲試験体の加熱状況



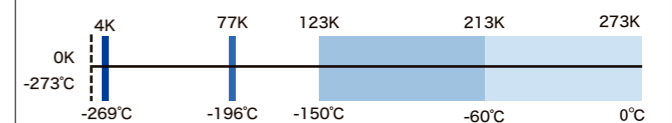
1.2.2 液体窒素浸漬

真空断熱構造の液槽内に、液体窒素が充填された可搬式低温容器(以後、液化窒素容器)から配管を經由して液体窒素を供給することで、-196℃(77K)の低温環境を再現する(第1図(b))。液槽内上部に設置した測温抵抗体の計測信号をもとに配管経路上に配置した電磁弁を開閉し、気化する液体窒素の液面を一定範囲の変動に維持する。また、供給経路を分岐させ、経路ごとに液化窒素容器と電磁弁を接続、時間差で開閉制御対象の電磁弁を切り替える機構も有しており、無人の浸漬環境維持が可能のため、たとえば1週間以上などの長期間にわたる疲労試験にも対応できる。今後ますます活発になるとと思われる宇宙開発関連部材の耐久性評価などにも貢献可能な再現技術と位置づけている。

1.2.3 液体窒素噴霧

液体窒素を噴霧することで槽内の空気を冷却する。(第1図(c))槽内に設置可能な最大長さの試験片平行部(JIS K 7139(2009)多目的試験片タイプA)の温度分布として、最低温度-150±3℃以内を昼夜連続1週間以上維持可能であり、長時間の疲労試験にも対応可能である。液体窒素浸漬の方式と同様に、液化窒素容器から一定圧力で送られてくる液体窒素の流入量を電磁弁の開閉で制御する。槽内入り口で噴霧状態にし、槽内が良い温度分布になるように、冷却された空気が対流する機構を有している。低温疲労試験を計画する際に、評価する部材のサイズや機械的性質などから試験機の荷重定格容量を選定するが、本槽は前項の液体窒素浸漬とともに可搬式であるため、高強度鋼から軟質樹脂材料までさまざまな材料の低温疲労強度評価が可能である。代表的な試験事例としては、水素および燃料電池の自動車に関する世界技術規則(GTR)にもとづく、燃料タンク部材の疲労特性評価がある。

第1図 低温環境装置における冷却可能な温度範囲と冷却方式



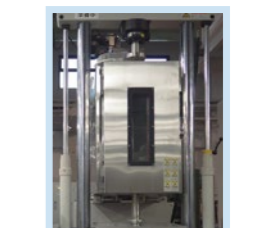
(a) 液体ヘリウム浸漬



(b) 液体窒素浸漬



(c) 液体窒素噴霧



(d) 冷凍機付き恒温恒湿槽

1.3 恒温恒湿環境

温度および湿度制御が可能な恒温恒湿槽を第1図(d)に示す。槽内の乾球温度および湿球温度の差により温湿度を制御する。槽の構成は、温湿度を調整する空間と試験空間の大きく二つにわかれる。両者は入りと出の通気口でつながっており、温湿度調整された空気が循環することで所定の環境を維持する。空気が含有できる水分量は温度と相関があり、ある温度における最大の水分を含んだ状態が相対湿度100%となるが、性能上各温度域で再現可能な温湿度に上限がある。当社で制御可能な高温側の上限は、温度80℃相対湿度90%であり、赤道付近の高温多湿を再現もしくは加速した環境下の強度評価などにも対応できる。

1.4 腐食環境

腐食が材料の疲労特性へ与える影響として、大きく二つの場合に分けて考えることができる。一つは材料が腐食することにより試験片形状に何らかの欠陥を生じさせ、そこが疲労き裂の起点となり疲労特性に影響をおよぼす場合であり、もう一つは環境により材料が変質することで材料自身の機械的特性が変化し、疲労特性に影響する場合である。疲労特性を評価するには腐食によって生じる影響因子を明らかにし、それを再現した模擬環境中でデータを取得する必要がある。

1.4.1 材料欠陥を生じる腐食

金属材料の腐食には、環境に接している表面全体がほぼ均一に腐食し減肉する全面腐食と、孔食や応力腐食割れといった局所的に腐食が進行する局部腐食がある。全面腐食するような場合については、腐食代の確保や塗装、電気防食などの手法で機器設計時に対策が講じられる。しかしながら、局部腐食は進行が均一ではなく、局所的に欠陥が生じ、そこを起点として疲労き裂が進展することで早期に破断するなど想定外の事象に繋がることもあり、局部腐食をとまなう環境での疲労特性を把握することは重要である。

局部腐食は一般的に腐食の起点となる欠陥の発生が遅く、潜伏期間を有する。そのため腐食環境を模擬して疲労試験を実施しても、試験期間中に欠陥の発生がなければ材料の疲労特性と差異がない結果になってしまう。材料欠陥の発生状況を押さえた上での試験計画が重要であり、場合によっては局部腐食の進展挙動と欠陥による疲労特性を分離して、模擬環境での腐食試験と欠陥を有する材料の疲労特性を個別に取得するといった体系的なアプローチも有効となる。

1.4.2 環境による材料変質をとまなう腐食

材料を変質させる環境として代表的なものが水素ガス環境である。脱炭素社会の実現に向けて、燃料電池や水素タービンの利用分野および液体水素輸送船や液体水素貯蔵タンクといったインフラ分野で注目される水素ガスではあるが、金属材料に侵入した水素原子が強度や延性を低下させる水素ぜい化が知られている。この水素ぜい化はとくに高張力鋼やマルテンサイト系ステンレス鋼といった高強度鋼で起こりやすく、近年注目されている事象である。

水素ガスは金属表面に吸着し、水素原子に乖離して金属材料

中に侵入する。侵入した水素原子は応力集中部に濃縮することで、き裂の進展を助長し、疲労寿命を短くする。この評価は試験片表面が所定の条件の水素ガスに接している環境で試験し、不活性ガス環境下での結果と比較することで疲労特性における水素ガスの影響を評価する。

1.4.3 腐食環境を模擬した疲労試験

腐食環境中での疲労試験として、代表的なものは腐食性溶液に浸漬しながら疲労試験をおこなう方法である。試験片の評価部である平行部からR部が溶液中に浸漬できるようにセルを取り付けて試験(第2図)を実施する。当社ではさらに試験片を陰極とした、陰極チャージ下での疲労試験も可能である。また、水素ガス環境下で評価する方法として、圧力容器内に高圧の水素ガスを封入して材料試験をおこなうことができる高圧水素材料試験機(写真3)がある。

第2図 腐食性溶液中での疲労試験模式図

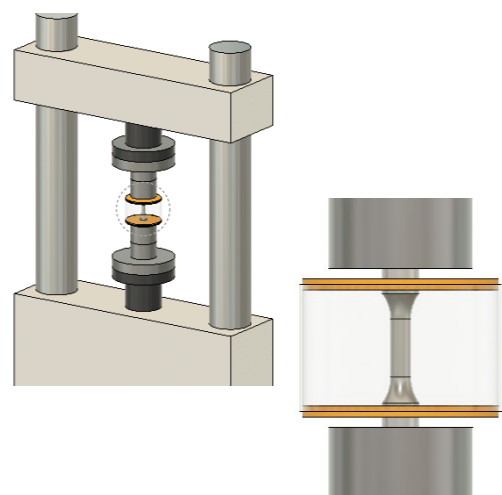


写真3 高圧水素材料試験機

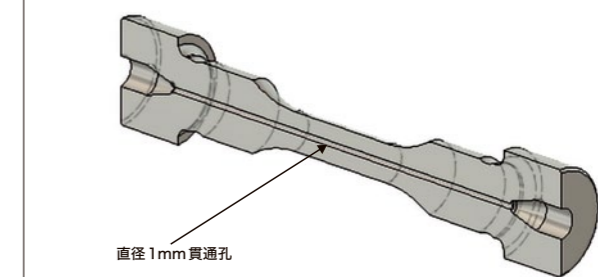
最高圧力	140MPa
温度範囲	-80~90℃
容器内寸法	φ150×L720mm
容器内寸法	ASME SA 638 (SUH660)
試験ガス種	水素、アルゴン、窒素、ヘリウム
温度制御方法	冷熱媒式超低温・高温冷熱媒循環 (低温側-100℃、高温側+100℃)
試験機荷重	最大荷重±100kN
周波数	0.01~1Hz
ひずみ速度	丸棒平滑試験片: 10 /s
対応可能試験	引張試験 (SSRT※含む) 高サイクル疲労試験 低サイクル疲労試験 疲労き裂進展試験・破壊靱性試験 プログラミング試験

※SSRT: Slow Strain Rate Test (低ひずみ速度引張試験)

圧力容器内を高圧の水素ガス雰囲気にし、容器を貫通したブルロッドで荷重を負荷することで材料試験をおこなう。高圧水素ガスを封入するためシールをもちいるが、しゅう動部において摩擦抵抗が生じるため、荷重は圧力容器内にあるロードセルで測定する。

圧力容器を使用しない水素ガス環境下での評価方法として、中空試験片をもちいた試験がある。特徴としては第3図に示すように、試験片中央に直径1mmの貫通孔を明け、その中に高圧の水素ガスを封入して、材料試験を実施する方法である。中空試験片をもちいることにより、封入するガス量が少量になることで安全性の確保や温度調整が容易になる。圧力容器が不要となり、しゅう動シール部を考慮する必要がないため、疲労試験での振幅速度を上げることができ、より短時間で評価が可能となる。

第3図 中空疲労試験片(半割イメージ)



C-2 内部要因

2.1 材料因子

ここでは、各種材料因子の疲労強度への影響について述べる。疲労強度へ影響を与える材料因子は多くある。たとえば、引張強さ(硬さ)、金属組織、欠陥、表面性状、残留応力が挙げられる。

平滑材では疲労き裂の発生は局所的なせん断滑りにより起こるので(滑り支配型)、平滑材の疲労強度は引張強さや硬度に比例する。この場合、疲労強度は引張強さや硬度からおおよそ推定できる。材料の有する欠陥が一定のサイズを超えると、欠陥支配型となり、疲労強度(疲労限界)は引張強さや硬度に比例しなくなる。これはアルミニウム合金でも同様の傾向がある。また欠陥支配型と滑り支配型では疲労限度線図の形も変化する。

欠陥支配型の場合、疲労強度は欠陥のサイズ、形状に強く依存する。なぜなら欠陥サイズ、形状により一定の負荷条件でもき裂先端(欠陥先端)の応力拡大係数が変化するためである。欠陥形状によっては応力拡大係数を正確に求められる場合もあるが、複雑な形状の場合には困難である。村上¹⁾は、鋼材中の任意形状の欠陥(介在物)について、欠陥(介在物)の最大主応力方向への投影面積と基材の硬度から次の式によって疲労限界を推定し、欠陥

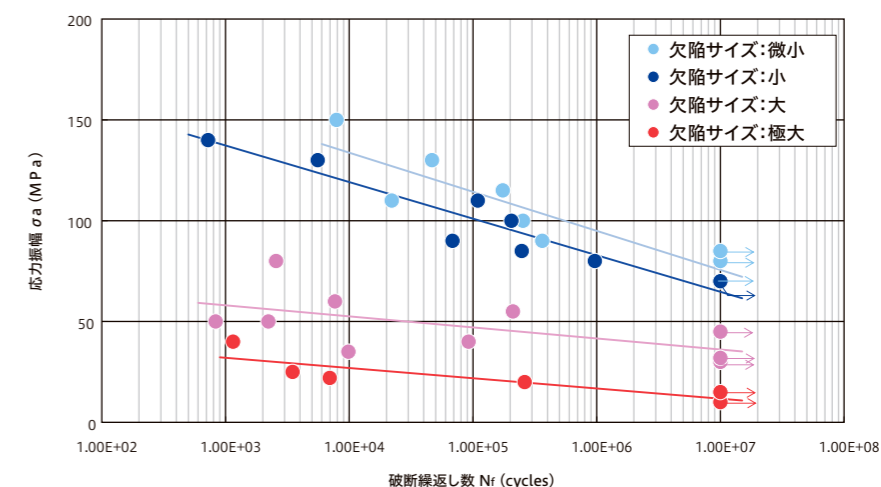
サイズ($\sqrt{\text{area}}$)1mm未満では実験値とよく一致することを確かめている。

$$\sigma_w = \frac{C(HV+120)}{(\sqrt{\text{area}})^{1/6}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで σ_w は応力振幅表示の疲労限界、HVは基材のビッカース硬度、 $\sqrt{\text{area}}$ は欠陥の最大主応力方向への投影面積、Cは欠陥の位置により異なる定数で、内部欠陥の場合は1.56、表面欠陥の場合は1.43である。

アルミニウム合金における欠陥サイズと疲労強度の関係を第4図²⁾に示す。 casting前の溶湯脱ガスの有無および舟型鋳物からの試験片採取位置を変えることにより、 casting欠陥の量を変えた試験片を製作し、その疲労強度を評価した例である。負荷様式は軸力、室温・大気中、応力比R=-1で実施した。欠陥サイズにより疲労寿命は変化し、欠陥サイズが大きくなるにつれ疲労強度は低くなること示された。また参考文献では村上の式による疲労強度予測もおこなっている。ご興味ある方は参照されたい。

第4図 アルミニウム合金における欠陥サイズと疲労強度の関係



2.2 表面粗さ

表面粗さの影響については村上らの報告がある。表面粗さを周期的な微小き裂に近似し、粗さの等価欠陥寸法を求めて疲労強度への影響を調べた³⁾。その結果、粗さの等価欠陥寸法をもちいて上述の式(1)の形で疲労強度を予測できることが明らかになっている。なお単一切欠き材よりも粗さ材の方が疲労強度は高くなる。これは切欠きの干渉効果により応力拡大係数が低くなるためである。そのため表面に極端に深い切欠きまたは粗さが存在する場合には、単一切欠きの予測をおこなえば疲労強度の下限値を推定できる。

2.3 残留応力

一般に平滑材では応力振幅一定の場合、引張平均応力が高くなるほど疲労寿命は短くなる。また、通常疲労き裂は表面から発生する。したがって、表面の残留応力が引張応力の場合、一定応力振幅においても残留応力が大きいほど疲労強度は低下する。逆に圧縮残留応力の場合には、残留応力が大きいほど疲労強度は向上し、内部起点が多くなる傾向がみられる。これは橋内らがTi-6Al-4V合金で指摘しているように⁴⁾、負荷応力と残留応力の和が最大になる位置が内部になることによるものと推定される。そのため、疲労強度には表面残留応力だけでなく、内部にかけての残留応力分布も重要となる。X線残留応力測定と電解研磨を繰り返すことにより、表面から内部にかけての残留応力分布測定が可能である。

C-3 再現試験

部品をそのまま疲労試験(耐久試験)をするのが難しい場合は、部品から試験片を切り出して試験することがある。この場合、試験片形状および治具を工夫して実機での負荷状態を適切に模擬することが肝である。また、素材から実部品相当の材料を作って、その材料から試験片を作製し試験をおこなうこともある。この場合は、部品の状態を模擬できるように素材に圧延や鍛造の塑性加工や熱処理を適切におこない、部品相当の材料(組織)を作りこむことが重要となる。また、素材を使う場合には、特定の因子のみを変化させてその影響を抽出することも可能である。製造工程だけでなく、稼働中の熱履歴、負荷履歴を模擬した材料を作ったの評価、人工欠陥を入れた試験など、材料および破壊力学の知識を駆使しての模擬試験をおこなった実績がある。

最後に破面観察から繰返し負荷応力を推定した例を示す。破面観察は実機の破壊調査はもちろん、再現試験において実機の破損モードを適切に再現できているかの検証としても重要である。破壊力学をもちいた応力推定の有効性の検証のため、公称応力値がわかっている状態で疲労試験をおこない、破面観察から応力推定をおこなった例を以下に示す。

アルミ合金7075-T651材の応力集中係数が約2.5の環状V溝切欠き付き試験片(第5図)をもちいて、以下の条件で疲労試験をおこなった。

- <試験条件>
- ・環境 : 室温・大気中
 - ・負荷様式 : 軸力
 - ・応力比 : R = 0.1
 - ・周波数 : 15 Hz
 - ・公称応力範囲 : 156 MPa(切欠き底での公称値)

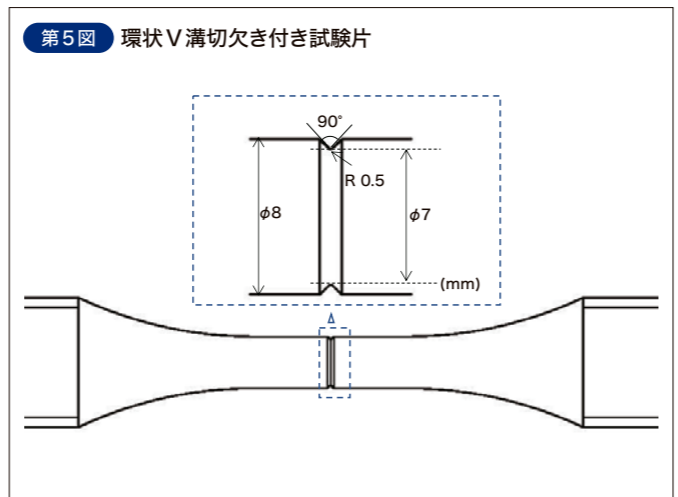
繰返し応力により破面に形成される縞模様(ストライエーション)の間隔を測定し、また破面形状からき裂長さや形状を推定し、以下の関係式より応力を推定した。

$$S = 9.4(1-\nu^2)\left(\frac{\Delta K}{E}\right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

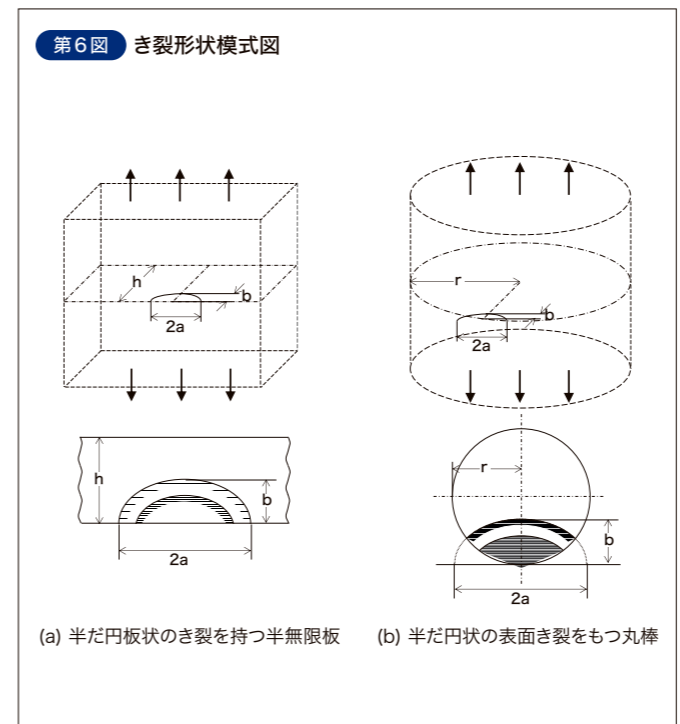
$$\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi b}F \dots\dots\dots(3)$$

ここで、Sはストライエーション間隔、 ν はポアソン比、 ΔK は応力拡大係数範囲、Eはヤング率、 $\Delta\sigma$ は公称応力範囲、bはき裂長さ、Fは負荷様式、き裂形状で決まる係数である。アルミニウム合金の一般的な値として、 ν は0.3、Eは70 GPaとした。S、bに破面観察から読み取った値を代入し、式(2)と式(3)を等値すると、 $\Delta\sigma = F \times$ 定数の形となり、Fが決まれば公称応力範囲が求められる。今回の試験片形状では、既知のFの表式はないため、近似の程度が異なる以下の2種類のき裂形状を仮定して、F(応力拡大係数)を算出して応力推定をおこなった。

- 1) 半無限板中の半だ円き裂⁵⁾(近似が悪いと想定)
- 2) 丸棒の半だ円き裂⁶⁾(近似がよいと想定)

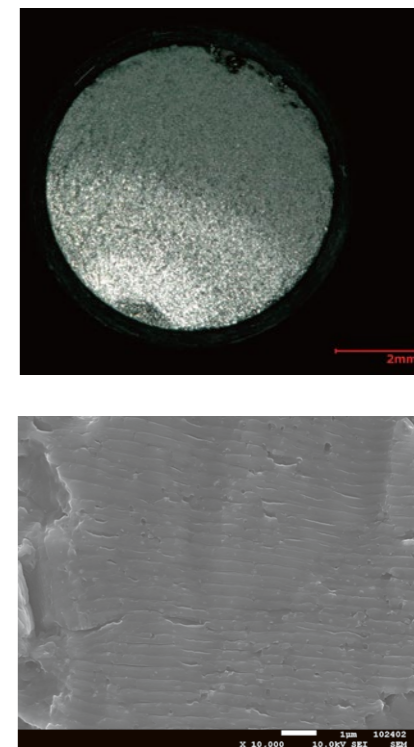


それぞれの場合のき裂形状模式図を第6図に示す。破面全景およびストライエーション間隔測定用破面を写真4に示す。ここでは詳細は割愛するが、起点からの距離(き裂長さ)1.94 mmにおける応力推定値は半無限板では208 MPa、丸棒では172 MPaとなった。切欠き底での公称応力値156 MPaと比較すると、丸棒



の方が実験値に近くなり、正確なFの値(応力拡大係数の値)がわからない場合において、き裂状態、負荷状態の取り扱いが推定精度に重要であることがわかった。より厳密に取り扱うにはFEMによりき裂前縁での応力拡大係数を求めることも可能であるが、破面観察のみからでも応力が推定できることの意義は大きい。

写真4 破面全景およびストライエーション間隔測定用破面



本稿では疲労破壊に影響する因子について、環境面と材料がもつ性質からみた評価手法の一部を解説した。各手法の適用にあたっては、製品自体がもつ内部因子と複合的に作用する外部因子を切り分け、各因子の影響度と疲労破壊メカニズムとの関連を探索することが重要である。当社では試作も含めた再現技術のさらなる高度化をすすめ、材料技術および環境再現技術にたけた技術者が横断的に連携することで、破損原因調査や余寿命評価などの課題解決型事案に今後も積極的に取り組んでいく所存である。

参考文献

- *1) 村上敬宜：鉄と鋼(疲労強度に及ぼす微小欠陥や非金属介在物の影響とその定量的評価法), 第75巻(1989)第8号, pp.1267-1277.
- *2) 大家正二郎：こべるにくす(アルミニウム鋳物の特性評価技術), Vol.14(2005)No.28
- *3) 村上敬宜ほか：疲労強度に及ぼす表面粗さの影響の定量的評価(粗さの深さとピッチの影響), 日本機械学会論文集(A編), 63巻(1997)612号, pp.1612-1619.
- *4) 橋内良雄ほか：Ti-6Al-4V合金の疲労強度に及ぼすショットピーニングの影響, 材料, Vol.43(1994)No.489, pp.666-671.
- *5) 石田誠ほか：半だ円板状表面き裂を持つ板の引張りと曲げ, 日本機械学会論文集(A編), 48巻(1982)429号, pp.607-619.
- *6) 西谷弘信ほか：半だ円状の表面き裂を持つ丸棒の引張りにおける応力拡大係数, 日本機械学会論文集(A編), 50巻(1984)453号, pp.1077-1082.