第7章　疲　労

目　的　　疲労強度に関する基本的な事項を理解する.

Figure 1.11 Fuselage failure in a passenger jet that occurred in 1988. (Photo courtesy of J. F. Wildey II, National Transportation Safety Board, Washington, DC; see [NTSB 89] for more detail.)

7.1　疲労の概論
- 7.1.1　疲労の重要性
- 7.1.2　開発事例
- 7.1.3　疲労現象

7.2　高サイクル疲労
- 7.2.1　S－N曲線と疲労強度
- 7.2.2　平均応力の影響
- 7.2.3　実働荷重の取り扱い
- 7.2.4　切欠き係数と寸法効果
- 7.2.5　き裂進展曲線
- 7.2.6　事故事例

7.3　低サイクル疲労
- 7.3.1　低サイクル疲労
- 7.3.2　事故事例

7.1　疲労 (fatigue) の概論

7.1.1　疲労の重要性

序　論

・疲労現象がはじめて問題になったのは産業革命時であり，蒸気機関車の車軸の折損事故にさかのぼる.

・最初の系統的な実験は，1852～1870年にAugust Wöhler による実験である. (S-N曲線は以前，Wöhler曲線と呼ばれていた)

・100年経過後の現在も，事故原因の80%程度が疲労により生じている. その理由は，

①疲労破壊直前まで，部材・部品に大きな変形等が生じず，事故後はじめて疲労が進行していたことを知るケースが多い.

②航空機や鉄道車両等の重要部品以外では，定期的な検査は行われない.

③設計者に疲労に関する知識が不足している.

④現在のコスト重視の開発では，十分な実証実験(実機試験)が行われない.

などである.

日本における過去20年の疲労を原因とする大事故

1985年 8月 6日 日航123便墜落事故
損害: 524名中520名死亡
原因: 大阪空港での「しりもち事故」の修理ミスによる圧力隔壁の疲労破壊

1995年12月 8日 高速増殖炉「もんじゅ」の金属ナトリウム漏洩事故
損害: 核燃料サイクル推進に深刻なダメージ
原因: 設計不良と予想外の振動が重なって温度計ケースが疲労破壊

1999年11月15日 国産H2ロケット8号機打ち上げ失敗
損害: 気象観測衛星の代替の遅延
原因: 液体水素燃料ターボポンプ(FTP)のインデューサーが極低温疲労
(実はNASAのデータを鵜呑みにしたのが原因)

機械設計業務に携わる技術者
疲労現象をよく理解しておくことが肝要である.

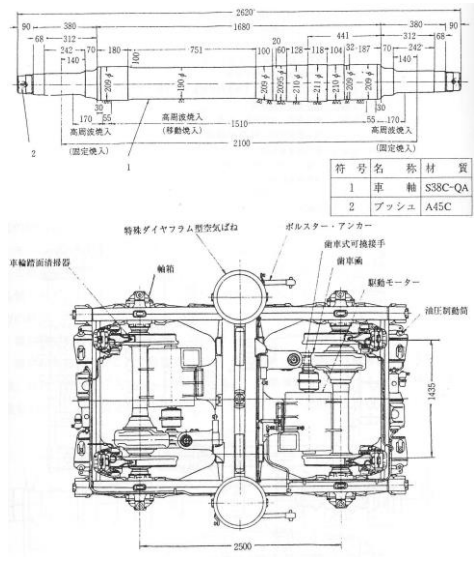
7.1.2 開発事例

0系新幹線の車軸設計

- 疲労研究は蒸気機関車の車軸折損事故にさかのぼる. 当然, 新幹線の車軸設計は慎重に進められた.
- 開発時には, ATC等のシステム開発とともに, 車軸や台車の新設計・安全性の保障が急務であった. 国鉄鉄道技術研究所(現JR総研)で, 最終的に図7.1に示すような車軸および台車が完成している.
- この車軸は絶対に壊れない(個人的にはこれ以上の設計はありえないと思う).

↓

それはなぜか？



符号	名称	材質
1	車軸	S38C-QA
2	ブッシュ	A45C

図7.1 0系新幹線の車軸と台車

0系の車軸が壊れないと考える理由

理由①
開発者の従来からの失敗が，かえって多くの技術的知識を習得することに役立った(開発者は以前，特急「あさかぜ」の車軸折損に遭遇している).

理由②
開発者は．スケールダウンした車軸・台車を貨物列車の後ろにつけて実機試験を長時間行った．実機試験の重要性を十分に理解していた．

昭和39年10月1日　東海道新幹線開業
当時　東京－新大阪間　4時間
現在　東京－新大阪間　2時間30分

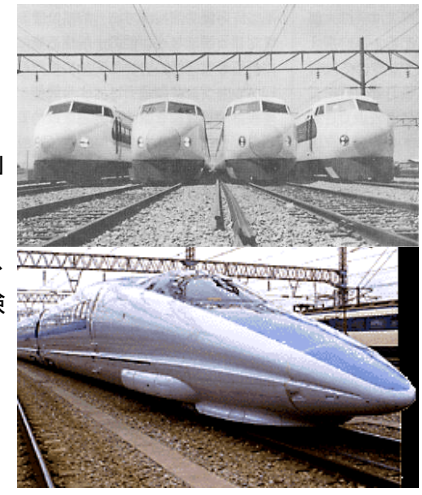


図7.2　0系および500系新幹線

開発者(中村宏先生)は今でも，現在の中空車軸(0系は中実車軸)の安全性に苦言を呈している.

このこだわりが，40年に渡る新幹線の安全性を支えている(故障等による死亡事故は0件，驚異的である).

7.1.3　疲労現象

疲労破壊

・降伏応力よりも低い繰返し応力下で生ずる破壊.
・疲労現象は以下の2つの段階に分類される.
　第1段階　最大せん断応力方向へのき裂の発生・進展
　第2段階　垂直応力と直行方向への進展＋せん断分離(最終破壊)

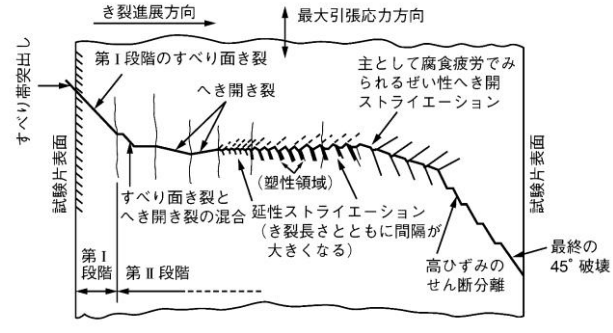


図7.3　疲労き裂の発生・進展挙動

第1段階

繰返し応力下において，最大せん断応力方向とすべり面が一致した結晶粒に平行な多数のすべりが不可逆的に生じる．

↓

入り込み(intrusion)と突き出し(extrusion)が形成され，これが成長して疲労き裂が発生する(図7.4)．

↓

き裂先端の応力場のため，さらにき裂は内部に向かって成長を続ける．

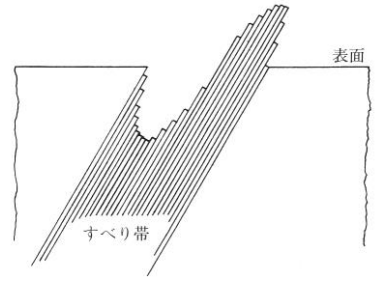


図7.4　疲労き裂の発生

第2段階

1結晶粒程度まで き裂が成長すると，き裂先端の応力場が大きくなり，進展方向は垂直応力方向に対して直行する方向へ変わる．

↓

き裂先端の鈍化・再鋭化を繰返し，き裂は内部へ進展していく(図7.5)．

破面には，この痕跡がストライエーション(striation)として認められる(図7.6，1サイクルあたり1つの模様)．

↓

き裂進展による有効断面積が減少し，もはや部材は荷重を支えることができずに最終破断に到る．

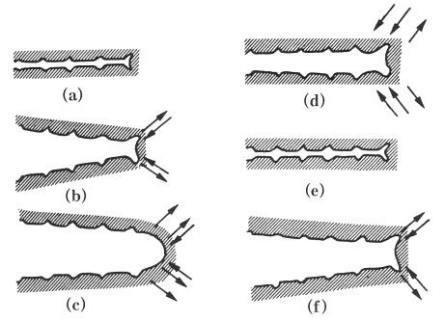


図7.5　疲労き裂の進展(第2段階)

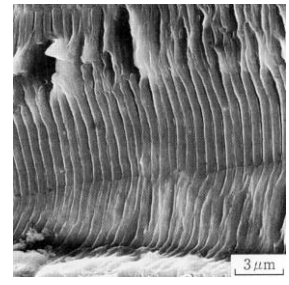


図7.6　ストライエーション

7.2 高サイクル疲労 (high-cycle fatigue)

7.2.1 S－N曲線と疲労強度

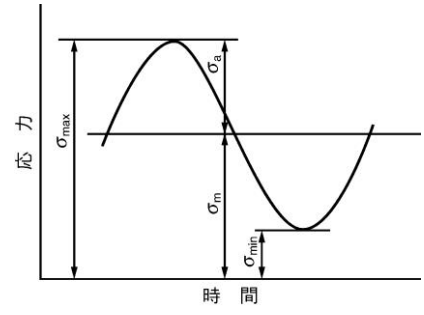


図7.7 正弦波応力

高サイクル疲労

破断繰返し数が 10^4 回程度以上である領域.

応力状態の表示

正弦波状の応力状態は,

①平均応力(mean stress) σ_mと
応力振幅(stress amplitude) σ_a

②最大応力 σ_{max} と最小応力 σ_{min}

の組合せとして与えられる. 併せて応力比(stress ratio) $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$ を用いる場合もある.

S－N曲線

・疲労試験結果は, 縦軸に応力を, 横軸に破断までの繰返し数をとって表示する. これをS－N曲線という(図7.8).

・非鉄金属材料などでは, S－N曲線は応力の減少とともに破断繰返し数が増加する右下がりの曲線となる. 一方, 鉄鋼材料ではある応力レベルで曲線が水平に折れ曲がり, それ以下の応力では破断しなくなる.

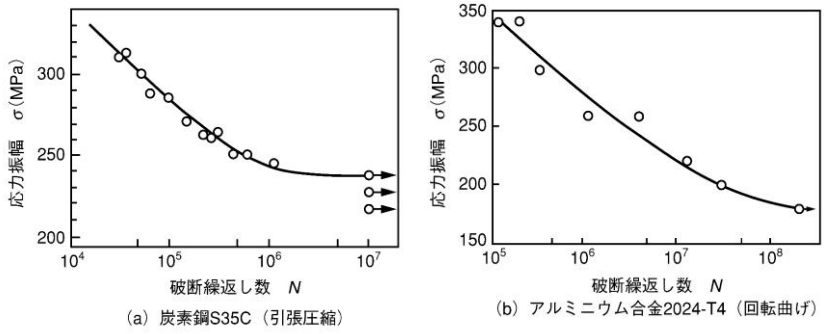


図7.8 S－N曲線の例

疲労強度 (fatigue strength)

疲労繰返し数10^7回に対応する時間強度を疲労強度という.

P-S-N曲線

・各応力レベルにおいて一定の破壊確率 P を与える繰返し数を求め, S－N曲線上に図示した線図(図7.9).

・破断寿命 N を一定として疲労寿命分布を考えた場合, 寿命の大小にかかわらず, ほぼ正規分布で近似できる場合が多い.

引張強さと疲労強度の関係

・鉄鋼材料の場合は特に，引張強さと疲労強度の間に明瞭な関係が認められる(図7.10).
・この関係は，基本的に静的強度レベルの上昇にともない，き裂の発生・進展が抑制されることに関係している.

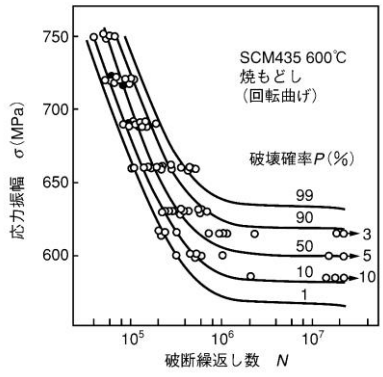


図7.9 P-S-N曲線の例

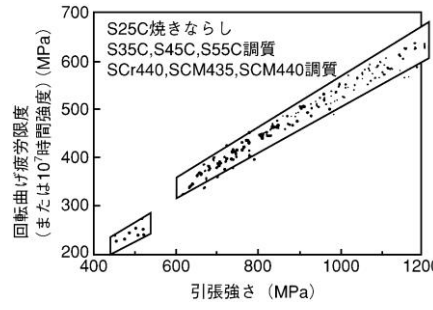


図7.10 引張強さと疲労強度の関係

7.2.2 平均応力の影響

疲労限度線図

応力振幅で表した疲労限度の値は引張りの平均応力 σ_m が存在すると減少し，圧縮の平均応力－σ_mが存在すると増大する．平均応力の影響は横軸に σ_m をとり，縦軸にこのσ_m の下での疲労限度 σ_a をとって，これらを結んだ疲労限度線図とよばれる図に表示される(図7.11).

Goodman線図

両振(R＝-1)の疲労限度σ_wと真破断応力σ_T を直線で結んだ疲労限度線図.

$$\sigma_a = \sigma_w\left(1-\frac{\sigma_m}{\sigma_T}\right) \quad (7.1)$$

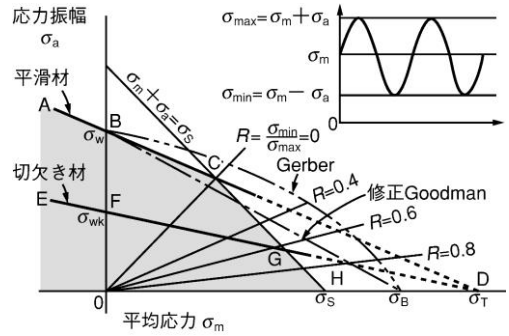


図7.11 疲労限度線図

その他の疲労限度線図

前式でσ_Tの代わりに引張強さσ_Bを用いる場合(修正Goodman線図)，降伏応力 σ_S を代入する場合(Soderberg 線図)，σ_w と σ_Tを2次曲線で結ぶ場合(Gerber 線図)がある.

使用範囲

横軸上で降伏応力σ_Sを通る線HCは$\sigma_a + \sigma_m = \sigma_S$，すなわち最大引張応力が降伏応力に達する限界線であるから，実際に使用できる範囲は図中の陰影部である.

曲げねじりの場合

実用上重要である曲げ応力 σとねじり（せん断）応力 τが同時に負荷される場合，疲労強度を与える式として次式がある.

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_w}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_w}\right)^2 = 1 \qquad (7.2)$$

ここでσ_w，τ_wは単独の曲げ，ねじり単独の作用下での疲労強度である.

7.2.3 実働荷重の取り扱い

機械・構造物に作用する荷重は，不規則に変動するのが普通.

↓

変動荷重による疲労寿命の推定法：累積損傷則（cumulative damage law）

マイナー則（Miner則）

損傷を独立と考えて線形に加算されるとし，下式のように和が1となったとき破断すると考える.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \qquad (7.3)$$

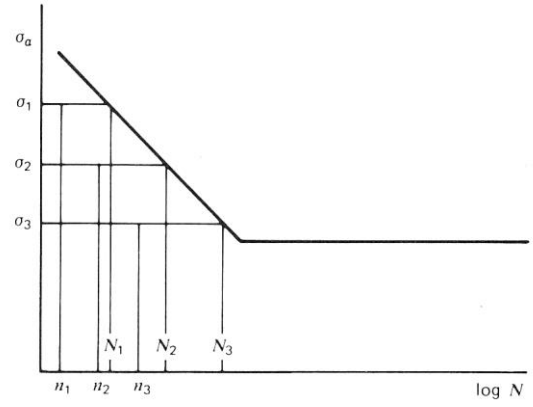


図7.12 多段の応力振幅

7.2.4 切欠き係数と寸法効果

切欠き係数 (fatigue strength reduction factor) β

・切欠材と平滑材の疲労強度比との関係

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\sigma_{wk}}{\sigma_w} \qquad (7.4)$$

・応力集中係数 α と異なる値を持つ.

・ α=3を超えると，き裂が発生後に停留するため β は変化しない.

寸法効果

・対象材料が大きいほど疲労強度は低下する.

・その原因は，材料が大きいほど応力勾配の関係で，破損確率が上昇するためである(6.1.3参照).

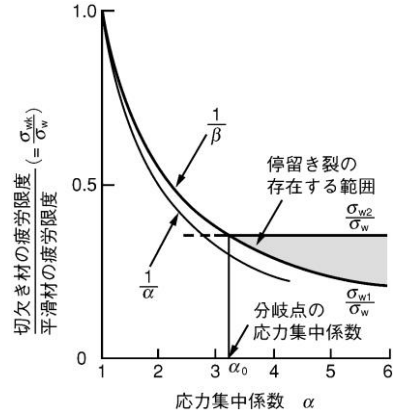


図7.13 応力集中係数と切欠き係数の関係

7.2.5 き裂進展曲線

き裂進展曲線

第2段階の疲労き裂進展に対し，き裂進展速度 da/dN を応力拡大係数幅

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \qquad (7.5)$$

を用いて整理すると逆S字形を呈する(図7.14). これが疲労き裂進展曲線である. なお $K_{\max}$, $K_{\min}$ は K 値の最大値および最小値である.

き裂進展下限界値（threshold）ΔK_{th}

曲線の左端でき裂進展速度が急速に低下し，進展しなくなる限界の ΔK のこと.

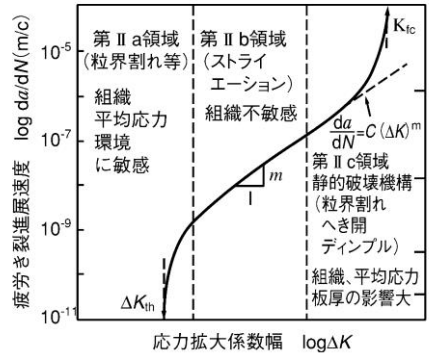


図7.14 き裂進展曲線

き裂の安定成長

中間領域は安定なき裂進展を示す領域であり，き裂進展速度は，

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (7.6)$$

という Paris の m 乗則で整理される．m=3～4の場合が多い．

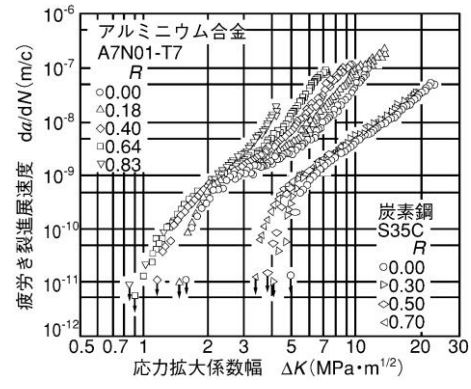


図7.15 き裂進展速度に及ぼす応力比の影響

最終破断

右側の高 ΔK 領域では，K_{max}が材料の破壊じん性値に近づき，急速破壊を生ずる．

平均応力の影響

平均応力が大きいほどき裂進展速度は大となる．$R = K_{min}/K_{max}$を用いて，き裂進展速度は下式の Forman の式により表される．

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_C - \Delta K} \quad (7.7)$$

7.2.6 事故事例

H2ロケットの打ち上げ失敗

1999年11月15日
国産H2ロケット8号機打ち上げ失敗

損害: 気象観測衛星の代替の遅延
原因: 液体水素燃料ターボポンプ(FTP)のインデューサーが極低温疲労

その後，深海艇を用いて部品回収．
破面の検査により，原因は疲労と断定．

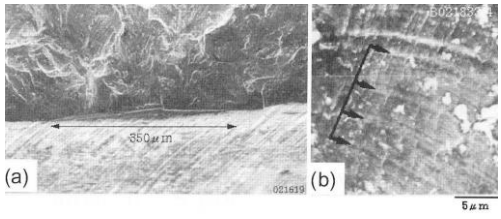


図7.17 左図a-2部の実際の破面

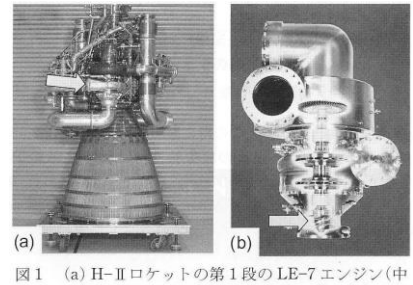


図1 (a) H-Ⅱロケットの第1段の LE-7 エンジン(中央矢印先が FTP：燃料ターボポンプ)．(b) FTP の模式図(下部矢印先に吸い込み部インデューサの渦巻き羽根がある)．

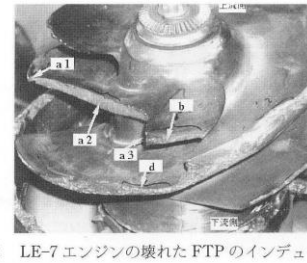


図2 LE-7 エンジンの壊れた FTP のインデューサ．

図7.16 LE-7エンジンの構造と破損部

極低温疲労実験

・液体窒素温度(20 K)における実験は多額のコストを要するため，設計時にはNASAのデータが主として用いられていた.

・後継機H2Aの安全性確保の必要性もあり，事故の詳細な実証実験が行われた．その結果，有用なデータが蓄積されると共に，NASAのデータが疲労強度を高く見積もりすぎていたことが判明した.

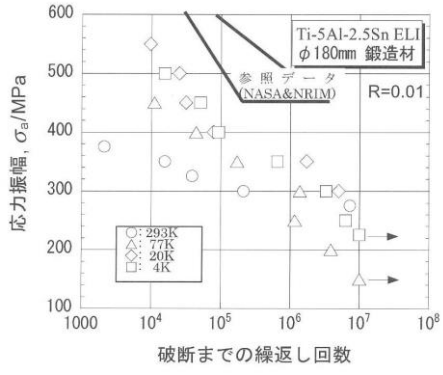


図7.18 Ti-5Al-2.5Sn ELIの疲労試験結果

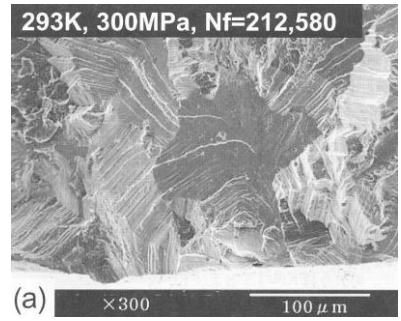


図7.19 Ti-5Al-2.5Sn ELIの疲労破面

7.3 低サイクル疲労

低サイクル疲労（low cycle fatigue）

・破断繰返し数が 10^4 回程度以下である領域.

・応力が降伏応力以上となるため，塑性変形を生じ，図7.20のようなヒステリシスループを描く.

・全ひずみ ε_a，弾性ひずみ ε_{ea} 塑性ひずみε_{pa}の間には次の関係がある.

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ea} + \varepsilon_{pa} \qquad (7.8)$$

$\Delta\varepsilon = 2\varepsilon_a$をひずみ幅，$\Delta\varepsilon_p = 2\varepsilon_{pa}$ を塑性ひずみ幅と呼ぶ.

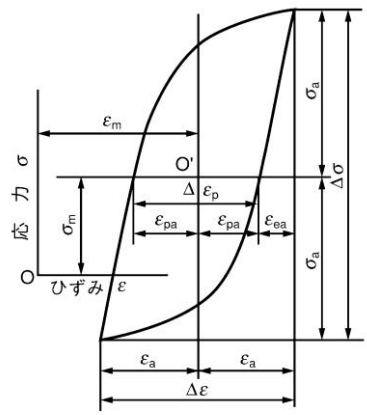


図7.20 応力ーひずみヒステリシス

Manson－Coffin式

低サイクル疲労における寿命は，塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon_p$ に支配され，図7.21に示すように，次のManson－Coffin式が成り立つ．

$$\Delta\varepsilon_p N^{\alpha} = C \qquad (7.9)$$

ここで C は破断ひずみ ε_f と $C \fallingdotseq 2\varepsilon_f$ の関係にある．また，多くの材料で α=0.5 である．

熱疲労（thermal fatigue）

ボイラやタービン，原子炉などにおいて，負荷の変動や発停時に熱応力が繰返され，疲労が問題となる．このような疲労は，熱疲労と呼ばれ，低サイクル疲労と同じである．

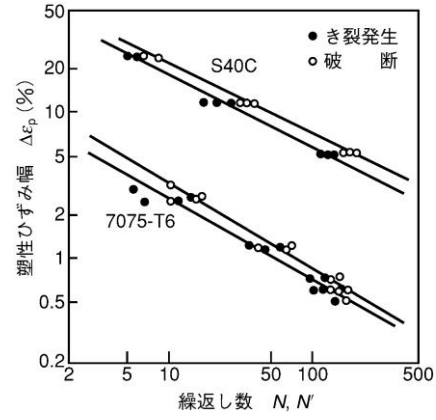


図7.21 疲労寿命曲線

7.3.2 事故事例

ジェット旅客機「コメット(Comet)」の墜落

- コメットは，イギリスのデハビランド社が製造した世界初の定期運行用ジェット旅客機である．
- プロペラ旅客機の約2倍のスピードで運行され，パンアメリカン航空などの航空会社から50機以上の受注を獲得した．
- 1953年5月2日，カルカッタのダムダム空港を離陸直後に墜落した．この事故はパイロットミスによるものとされ，実際，その後の連続事故とは無関係であった．

図7.22 De Havilland DH106 Comet Mark.I

・1954年1月と4月に2機が続けて墜落した．墜落原因が不明であったため，全運行が停止させられた．

・王立航空研究所によって徹底的に調査が行われた結果，離着陸の繰返しにより与圧された胴体が低サイクル疲労を起こし，窓枠などの応力集中部からき裂が発生，突然の減圧と構造の破壊が生じたことが判明した．

・金属疲労の対策を行い，サイズアップしたコメット4は1958年に定期航空便として復帰したが，その時点でボーイング707やDC-8にジェット旅客機の市場を奪われてしまっていた．

7章演習問題

問題 1　金属材料における疲労き裂発生のメカニズム(第1段階)と進展のメカニズム(第2段階)を説明せよ．

問題 2　ある材料の平滑材の疲労強度が 300 MPa であった．切欠き係数が2の切欠き材の疲労強度を推定せよ．

問題 3　下記の項目が疲労強度に与える影響を説明せよ．

(3-1)　飛行機のリベット穴．
(3-2)　大きな平均応力．
(3-3)　製品の大きさ．

問題 4　ある強度部材は破壊靭性 K_{IC}=54 MPa m$^{1/2}$の鉄鋼製である．超音波法による非破壊検査の結果，この部材には長さ $2a_0$=0.2 mm のき裂が含まれていることが判明した．$\Delta\sigma$=180 MPa，応力比R=0である時，急速破壊が生じるまでの繰返し数を計算せよ．なお，き裂進展速度および応力拡大係数幅は下式で与えられるとする．

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m,\ C = 4\times10^{-13}\ \mathrm{MPa}^{-4}\ \mathrm{m}^{-1},\ m = 4,\ \Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}$$

問題 5　高温で使用する設備を急停止すると，ステンレス鋼製の部材が変位を固定されたまま，600 ℃から400℃まで低下する．ステンレス鋼のマンソンーコフィン式が下式で与えられるとした場合，設備を何回急停止したら破壊に至るか推定しなさい．ステンレス鋼の熱膨張係数を $1.2\times10^{-5}\ \mathrm{K}^{-1}$，降伏ひずみを$0.4\times10^{-3}$とする．

$$N_f{}^{1/2}\Delta\varepsilon_p = 0.2$$

7章演習問題解答

問題 1　7.1.3節参照.　　問題 2　150 MPa

問題 3　各自7.1節を参考に考えよ.

問題 4　$K_{\mathrm{IC}} = K_{\max} = \Delta\sigma\sqrt{\pi a_c}$ より，$a_c = \dfrac{1}{\pi}\left(\dfrac{K_{\mathrm{IC}}}{\Delta\sigma}\right)^2 = \dfrac{1}{\pi}\left(\dfrac{54}{180}\right)^2 = 0.0286\ (\mathrm{m})$

よって　$N_f = \displaystyle\int_{a_0}^{a_c}\frac{da}{C\left(\Delta\sigma\sqrt{\pi a}\right)^4} = \int_{1\times10^{-4}}^{0.0286}\frac{da}{4\times10^{-13}\left(180\sqrt{\pi a}\right)^4} = 2.33\times10^6$

問題 5　$\Delta\varepsilon_p = \Delta\varepsilon_a - \Delta\varepsilon_e = 1.2\times10^{-5}(600-400) - 0.4\times10^{-3} = 2\times10^{-3}$

よって　$N_f = \left(\dfrac{0.2}{\Delta\varepsilon_p}\right)^2 = \left(\dfrac{0.2}{2\times10^{-3}}\right)^2 = 1\times10^4$