

# 第5回目 疲労試験, フラクトグラフィー

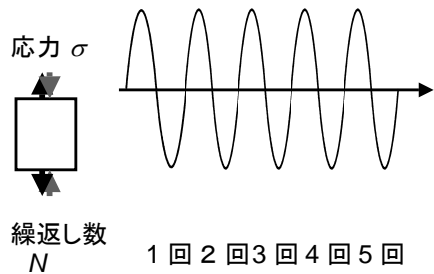
生命医科学部 医工学科  
バイオメカニクス研究室(片山・田中研) IN116N  
田中 和人  
E-mail: ktanaka@mail.doshisha.ac.jp  
内線: 6408

## 疲労試験の意義と試験法

- 材料に繰り返し荷重が負荷されると、材料中に生じる繰り返し応力の最大値が降伏点以下でも材料が破壊することがある。



- 疲労 (fatigue) : 疲労が原因で破壊に至ることを疲労破壊という



- 応力振幅  $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$  (a: amplitude)
- 平均応力  $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$  (m: mean)
- 応力比  $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$

- 疲労試験
  - 両振り
  - 片振り

- 回転曲げ疲労試験: 車軸の疲労破壊
- 平面曲げ疲労試験
- 引張圧縮疲労試験
- ねじり疲労試験
- 組み合わせ応力疲労試験

プリントNo.4 図3.17

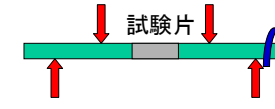


## 疲労試験方法

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



- 丸棒試験片を四点曲げした状態で回転させる
- 試験片には一定曲げモーメントがかかっている



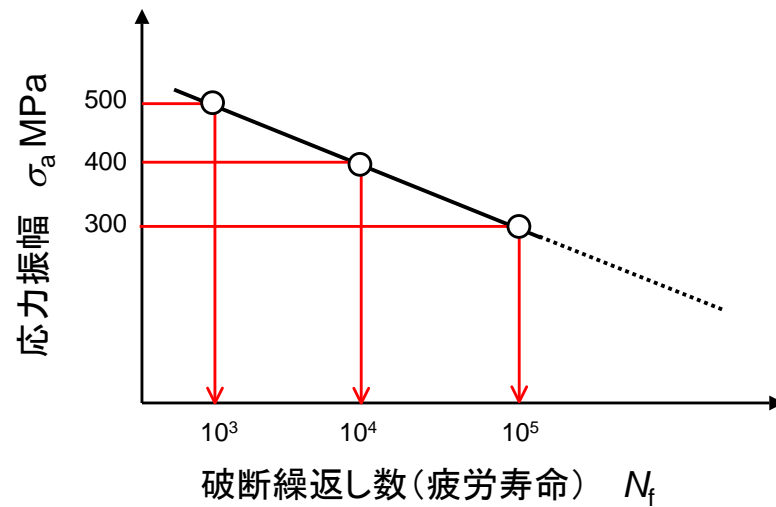
$$\sigma_x = \frac{M_x}{I_z} y$$

$I_z$ : 断面二次モーメント



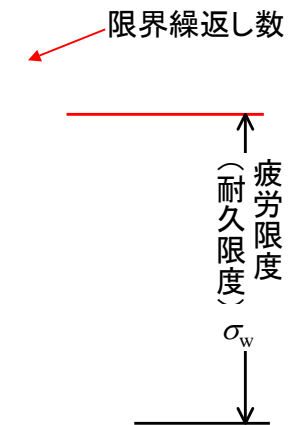
## 回転曲げ疲労試験とは

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



## S-N曲線

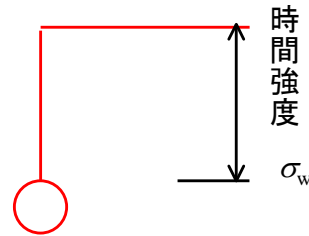
ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



## 典型的なS-N曲線

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp





Al合金, 高温, 腐食疲労ではS-N曲線に水平部が見られない



## 典型的なS-N曲線

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



- 疲労破壊
  - 静的破壊よりも低い負荷の繰返し
  - き裂の発生, 進展, き裂進展に伴う断面積の減少により静的最終破壊
  - ぜい性破面: き裂進展経路に塑性変形が限定
- ぜい性的外観
  - ビーチマーク, シェルマーク(貝殻模様): 応力変動時のき裂前縁の位置を示す

図5.2 分塊圧延用ロール駆動軸(直径430mm)の疲労破面写真

改訂機械材料学 p.112 図5.2



## a. 疲労破壊の巨視的様相

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



- 引張り時のき裂先端の塑性鈍化と圧縮時のき裂先端の再鋭化
- き裂の上下面では山と山, 谷と谷が対応
- ストライエーション間隔=1サイクル間のき裂進展量
- 疲労破面全面がこれによって覆われているわけではない
- 延性ストライエーション: 軟い材料
- ぜい性ストライエーション(ぜい性き裂進展+塑性鈍化・再鋭化): 硬い材料, 腐食

- き裂の発生場所: 材料や負荷応力によって異なる.
- フェライト鋼や純金属の高サイクル疲労領域:
  - 最もすべり易い方位と方向を持ったすべり系の中
  - 入り込み(intrusion)や突き出し(extrusion)が形成
  - 入り込みからき裂が発生



## b. 疲労破壊の微視的様相: ストライエーション(striation)

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



## c. 疲労き裂の発生と進展

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



- 表面には、多くのすべり帯が形成されるが、将来、き裂発生場所となる入込みは、表面を数 $\mu\text{m}$ 程度電解研磨しても消失しないことから、固執すべり帯(PSB, persistent slip band)と称されている。
- 負荷応力が大きい場合、結晶粒全体が変形するため、変形の食い違いが蓄積する結晶粒界にき裂が発生する。
- 切欠き感度の高い高強度鋼やアルミニウム合金では、介在物がき裂発生場所となることが多い

すべり集中域の微視的構造



### c. 疲労き裂の発生と進展

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



すべり帯の断面

疲労試験におけるすべり帯

引張り試験におけるすべり帯



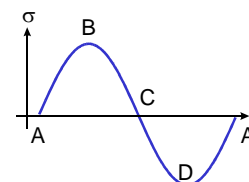
### すべり帯のAFM(原子間力顕微鏡)像

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



- き裂:すべり面に沿って成長(第 I 段階)
- き裂進展(第 II a段階): 応力軸に傾斜していたき裂が応力軸に垂直に向きを変化
  - すべり面き裂
  - へき開面き裂
- き裂進展(第 II b段階)
  - 応力軸に垂直
  - 疲労ストライエーション
  - 塑性鈍化と再鋭化の繰返し
  - 組織不敏感

- 塑性鈍化と再鋭化の繰返し
- A-B:大きなすべり変形, き裂長く, 鈍化(blunting)
- B-C: 除荷過程, き裂閉口, 鈍化したき裂先端部分はひだ状に織り込まれる
- C-D-A:再鋭化(re-sharpening)



### c. 疲労き裂の発生と進展

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



### 疲労き裂先端の鈍化とストライエーションの形成機構

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



- 第 II c 段階
  - デインプル
  - へき開
  - 粒界割れ



## c. 疲労き裂の発生と進展

ktnaka@mail.doshisha.ac.jp



プリントNo.4 右



## 疲労破壊形態まとめ

ktnaka@mail.doshisha.ac.jp



- 疲労限度:
  - 微視き裂の進展の限界応力
  - 負荷形式に依存: 回転曲げ疲労限度, 引張圧縮疲労限度, 繰返しねじり疲労限度 正の相関
  - 疲労限度と引張り強さの関係:  $\sigma_w = \sigma_B/2$ , 欠陥や介在物のため疲労限度は頭打ち

改訂機械材料学 p.116 図5.7



## 疲労限度

ktnaka@mail.doshisha.ac.jp



1. フラクトグラフィとは
  - 破断面の観察: 破壊機構, 事故原因の解明
  - 観察手法
    - 肉眼
    - ルーペ
    - 実体顕微鏡
    - 金属顕微鏡
    - 走査型電子顕微鏡(SEM)
    - 透過型電子顕微鏡(TEM)



## フラクトグラフィ

ktnaka@mail.doshisha.ac.jp



■ 光のかわりに電子で見る

光学顕微鏡

走査型電子顕微鏡(SEM)

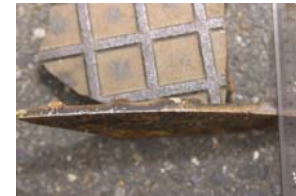


光学顕微鏡と電子顕微鏡

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



■ 腐食, 設置ミス



2004年5月18日某大学物理系校舎裏にて

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



- 機械的損傷を受けないように注意
- 破面のさび取り法:
  - プラスチックレプリカを何回もとるブランクレプリカ法
  - 超音波洗浄法
  - 酸洗い法

- 延性破面
  - 直角破面: 内部, 平面ひずみ下, 繊維状,
  - 傾斜破面: 表面, 平面応力下, なめらか
- ぜい性破面
  - 直角破面, へき開破壊(へき開面), 粒状

図11.1 過荷重により破壊した板材の巨視的破面

プリントNo.5 図3-22

改訂機械材料学 p.183 図11.1



破面の保存と前処理

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



巨視的破面

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



■ 起点の割り出し

(a)ラチェットマーク

(c)ラジアルマーキング  
(放射状模様)

(b)フィッシュアイ

(d)シェブロンパターン  
(山形模様)

(e)ビーチマーク  
(シェルマーク)



巨視的破面

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



■ 回転曲げ疲労試験

■ 起点が多数ある場合に段差ができる



ラチェットマーク

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



起点

→放射状模様

→山形模様(へき開, デンプル)

プリントNo.5 図3-22

改訂機械材料学 p.183 図11.1



図11.1 過荷重により破壊した板材の巨視的破面

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



■ 貝殻模様(shell mark, beach mark)

■ 荷重変動時のき裂先端位置

図11.2 送風機羽根に現れた貝殻模様

改訂機械材料学 p.184 図11.2



疲労破壊におけるビーチマーク

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



## 金属組織学的な破壊の分類

- 結晶粒内破壊 (Transgranular Cracking)
  - へき開破壊: ぜい性破面 リバーパターン
  - 微小空洞の成長と合体: デンプル
  - すべり面分離: ストライエーション, ストレッチゾーン
- 結晶粒界破壊 (Intergranular Cracking)
  - 粒界ぜい性破面



### 微視的破面の特徴

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



## a. 粒内破壊

- ぜい性破壊: へき開破壊—へき開段, リバーパターン

改訂機械材料学 p.184 図11.3

高張力鋼の低温シャルピ°衝撃試験による  
へき開破面(矢印は微視的なき裂進展方向を示す。)



### 微視的破面

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



## a. 粒内破壊

- 延性破壊: デンプル—微小空洞の成長, 合体

第二相粒子(介在物, 析出物)が核となり多数の微小空洞ができる



### 微視的破面

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



## a. 粒内破壊

- 延性破壊: デンプル—微小空洞の成長, 合体  
等軸デンプル(図11.4) 伸長デンプル

図11.4 高張力鋼HT80のシャルピ°衝撃試験によるデンプル破面

SS41鋼のシャルピ°衝撃試験

改訂機械材料学 p.185 図11.4



### 微視的破面

ktanaka@mail.doshisha.ac.jp



a. 粒内破壊

- 疲労破壊: ストライエーション-き裂先端の鈍化(開口)と再鋭化(閉口)の繰返し

a. 粒内破壊

- ストライエーション間隔 = き裂進展速度

パッチ(プラトー)

Ti-6Al-4V合金の疲労破面における

ストライエーション模様(矢印はき裂進展方向を示す。)

改訂機械材料学 p.186 図11.5



微視的破面

kstanaka@mail.doshisha.ac.jp



微視的破面

kstanaka@mail.doshisha.ac.jp

b. 粒界破壊

- 粒界ぜい性破壊-ロック・キャンディ・パターン(粒界ファセット)
- 粒界析出物などによりほとんど塑性変形をとまわず破壊
- SCC, 水素ぜい化, 焼もどしぜい化, クリープなどでみられる

- ductile: 延性, brittle: ぜい性
- striation: ストライエーション
- fracture surface: 破面
- fractograph: 破面観察
- fracture nucleus: 破壊起点
- cleavage: へき開
- higher magnification view of .....
- arrow indicates fracture direction.

図11.6 7075Al合金の応力腐食割れによる粒界破面

改訂機械材料学 p.186 図11.6



微視的破面

kstanaka@mail.doshisha.ac.jp



Technical term

kstanaka@mail.doshisha.ac.jp

プリントNo.5