# 材料強度学(6)

## 疲労寿命に影響を及ぼす因子

#### 平均応力 表面効果 設計因子 表面処理

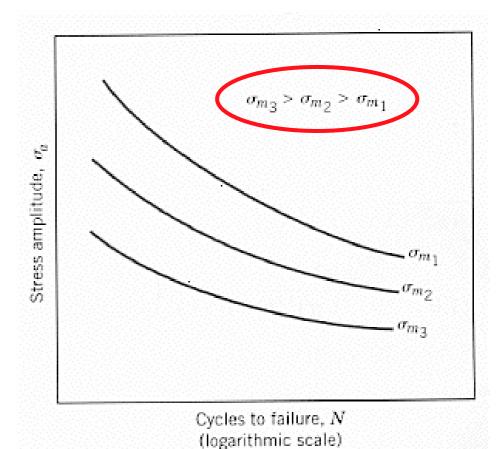
## 平均応力

平均応力の上昇により疲 労寿命は低下

平均応力

$$_{\rm m} = \frac{\max + \min}{2}$$

**両振**: m = 0



## 表面効果

一般的な負荷条件(曲げ、ねじり等)では最大応力は表面で生じる



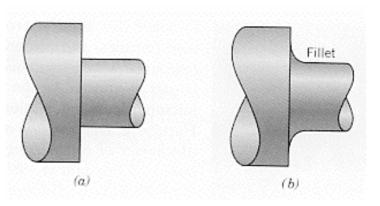
疲労き裂は表面、特に表面の応力集中箇所で発生



疲労寿命は表面状態や表面形状に敏感

## 設計因子

切欠きや形状の不連続性は 応力集中源やき裂発生源



応力集中を低減するための設計例(a) (b)へと設計変更する

## 表面処理

#### 切削加工時の表面傷が疲労寿命を支配



#### 表面研摩により疲労寿命は大きく向上

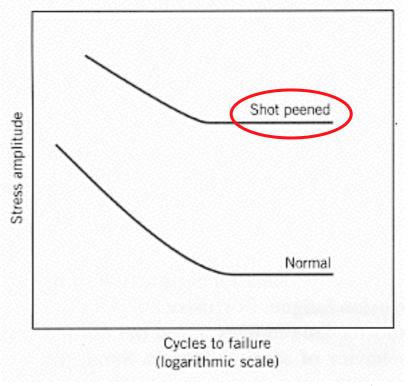
# 表面層への残留圧縮応力付与は疲労寿命向上に有効

#### ショットピーニング

直径0.1~1.0mmの硬い粒子を 部材表面に高速で射出



ショット直径の1/4~1/2の深さ に圧縮応力を誘起



鋼のS - N曲線へのショットピー ニングの効果

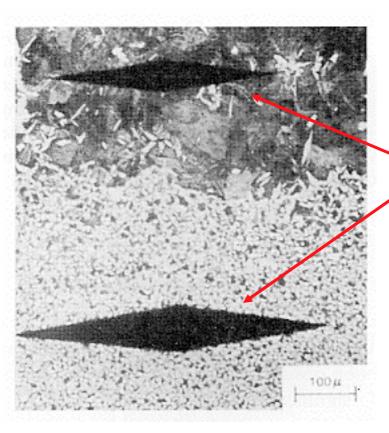
#### 表面硬化 (case hardening)

#### 鋼の表面硬度と疲労寿命を向上させる手法

浸炭 窒化:部材を高温で炭素や窒素雰囲気にさらす

表皮部

芯部



験の圧痕

り表面が硬化

残留圧縮応力の付与

炭素濃度の増加によ

ヌープ微小硬さ試

浸炭処理をした鋼の組織

## 環境の効果

環境によって疲労の進行が加速

熱疲労 (Thermal fatigue) 腐食疲労 (Corrosion fatigue)

## 熱疲労



高温における熱応力の変動が原因 外部応力を必ずしも必要としない 熱応力は温度変動(T)にさらされる構造部材の 膨張や収縮が拘束されることにより発生

= E T ( : 熱膨張係数E: 弹性係数)

温度変化による寸法変化を許容できるような設計、 材料選択が重要

## 腐食疲労

繰返し応力と化学的腐食が同時に作用して起こる疲労破壊

材料表面に腐食ピットが生成



疲労き裂発生を促進

き裂先端で形成される新生面と の化学反応



──∖疲労き裂進展速度 を加速

#### 応力負荷周波数の影響

応力負荷周波数の減少は、開口したき裂が腐食環境にさ らされる時間を長くし、疲労寿命を低下させる

#### 対策

保護性の表面被膜の付与 耐食性材料の開発

# クリープ (creep)

主として高温下で一定荷重にさらされる材料に生じる時間依存型の破壊

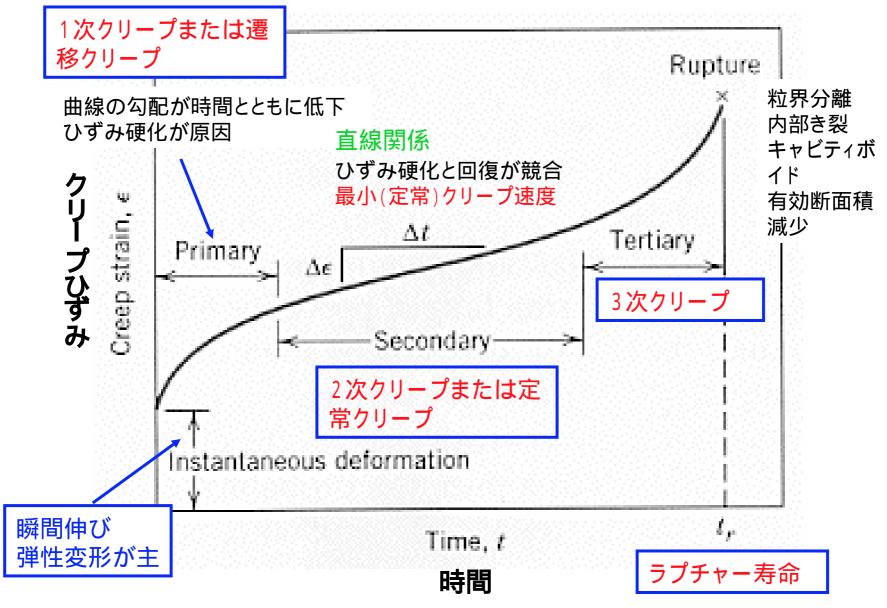
ジェットエンジン、蒸気発電機のタービンロータ、高圧蒸気ライン等で問題

すべての材料で発生 金属では 0.4Tm 以上の温度で問題となる

#### 金属材料のクリープ試験

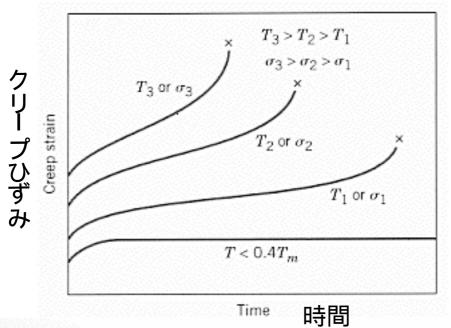
通常、丸棒試験片を一定荷重(応力)で一軸引張 または圧縮し、試料長さの変化を測定

## 一定荷重下のクリープ挙動



一定荷重(応力)、一定温度条件での典型的なクリープひずみ 時間関係

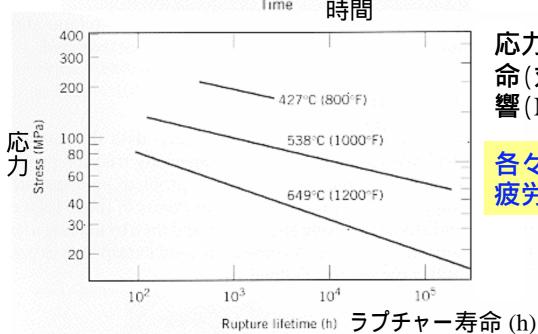
### 応力と温度の影響



クリープ挙動に及ぼす応力 と 温度 *T* の影響

#### 応力、温度の上昇により

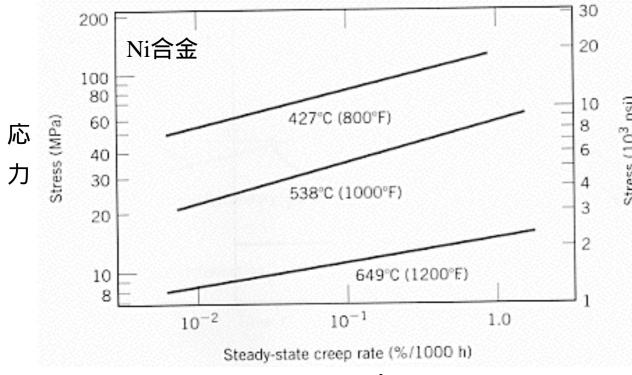
- (1) 負荷時の瞬間ひずみが増加
- (2) 定常クリープ速度が増加
- (3) ラプチャー寿命が低下



応力(対数表示) ラプチャー寿命(対数表示)関係と温度の影響(Ni合金の例)

各々の温度で直線関係 疲労におけるS-N曲線に対応

## 定常クリープ速度



 $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{s} = K_{1} \sigma^{n}$ 

n の値はクリープ 機構解析のための 目安になる 応力指数

定常クリープ速度

#### 温度の影響を考慮

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_s = K_2 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$$

#### クリープ機構

- ·応力誘起空孔拡散
- ·粒界拡散
- ·転位運動
- ・粒界すべり

クリープの活性化エネルギー

### Larson - Miller 因子

クリープ試験によっては試験が長時間に及ぶため研究室での実験は困難

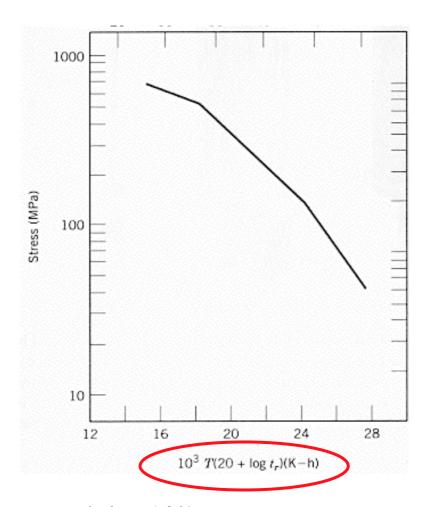


高温·短時間での加速試験の適用



結果を低温·長時間に 外挿

Larson - Miller 因子



応力の対数とLarson - Miller 因子の 関係(鉄鋼材料の例)

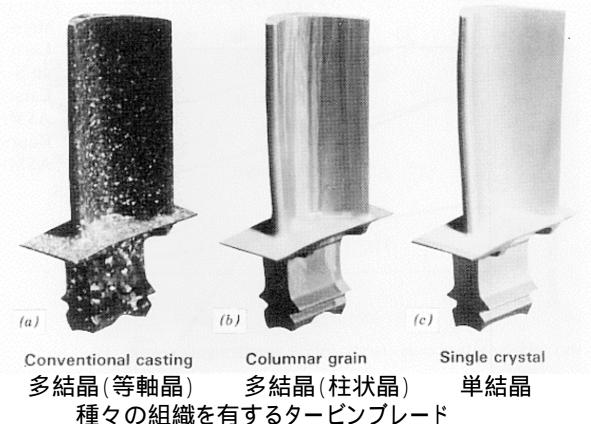
T(C + log tr) Tは絶対温度、trは時間(h)、Cは定数

## 高温用材料(耐熱材料)

材料のクリープ特性は、融点、弾性係数、結晶粒径に依存 高融点、高弾性係数のものほどクリープ抵抗が大きい 結晶粒径が大きい方がクリープ抵抗が大きい (結晶粒が細かいと粒界すべりが起こりやすい)

CoやNi系超合金の クリープ抵抗は、固溶強 化と分散強化によって 向上

一方向凝固(柱状 晶組織)や単結晶化も クリープ抵抗向上のた めに有効





### 疲労特性とS-N曲線

疲労は、負荷応力が時間とともに変動する場合に起こる破壊である。疲労特性は、応力と破壊までの繰返し数との関係として図示される。(S-N曲線)

多くの材料では、破壊までの繰返し数は応力の低下ととも に増加する。疲労強度は、ある特定の繰返し数における破壊応 力である。

ある種の鋼やチタン合金では、応力は繰返し数とともに減少し、ついには繰返し数に無関係になる。

#### (疲労限)

疲労寿命とは、ある特定の応力での破壊までの繰返し数である。



## 疲労き裂の発生と進展

き裂は通常、材料表面に発生する。

き裂進展にはふたつの段階があり、それらはき裂進展の方向や速度によって特徴付けられる。

#### (ステージ 、ステージ )

ステージ のき裂進展メカニズムは、き裂先端の鈍化と再 鋭化の繰返しである。

特徴的な疲労破面としてビーチマークとストライエーションがある。ビーチマークは応力負荷が中断を受ける場合に生じ、通常、肉眼で観察される大きさである。 疲労ストライエーションは微視的なサイズであり、ストライエーションのひとつの縞模様は、1負荷サイクル中のき裂先端の進展量に対応すると考えられている。

## 疲労き裂進展速度と疲労寿命延長

き裂先端の応力拡大係数範囲を用い、疲労き裂進展速度を解析的に表すことができる。(da/dN - K曲線)

パリス則を用いて、疲労寿命を推定することができる。 疲労寿命を延長する手法として、(1)平均応力を下げる、

(2)表面の不連続性をなくす、(3)表面を研摩する、(4)ショット ピーニングによって表面に圧縮残留応力を付与する、(5)浸炭 や窒化によって表面層を硬化させるなどがある。

材料の疲労挙動は環境による影響を受ける。

(熱疲労、腐食疲労)

#### クリープ



材料の時間依存型破壊をクリープといい、0.4Tm以上の温度、一定荷重(応力)下で起こる。

クリープ曲線(ひずみ 時間曲線)は、通常3つの領域からなる。

重要なクリープ特性として定常クリープ速度とラプチャー 寿命がある。

温度、応力によってクリープ挙動は変化する。

定常ひずみ速度の応力指数やクリープの活性化エネルギーからクリープ機構を推定できる。

Larson - Miller 因子を用いてクリープ試験のデータを低温、長時間側に外挿することができる。

一方向凝固や単結晶化によりクリープ特性の向上が 図られている。