

2021/6/25 材料計測学10

- (1) 確認問題10(6/26中にupload予定)を解き、WebClassから入力して、
7/1(木)23:59までに100点をとってください(制限回数は10回)。
- (2) 今回と次の説明用動画です。

今回 動画10(14:43) <https://youtu.be/YGkQleMeJLI>

次回 動画11(12:30) <https://youtu.be/p6b-DUXXhLg>

- (3)参考動画です。

https://www.youtube.com/watch?time_continue=2&v=ei_WB7ijj4E&feature=emb_NIMS クリープ試験(3:22) 良い動画です。

https://www.youtube.com/watch?v=LhUclxBUV_E

Fatigue Test 12:00 英語です。疲労試験の良い動画です。

https://www.youtube.com/watch?v=J9K0bDkOFxU&list=RDCMUCBLvUpsQXGZKAdVeg4_1WxKg&index=19

NIMS事故調査 (5:00)

材料計測学

①-③:組織・構造, ④-⑥:化学組成・結合状態

⑦:熱特性 ⑧⑨⑩:力学特性(クリープ・疲労試験)



第10回

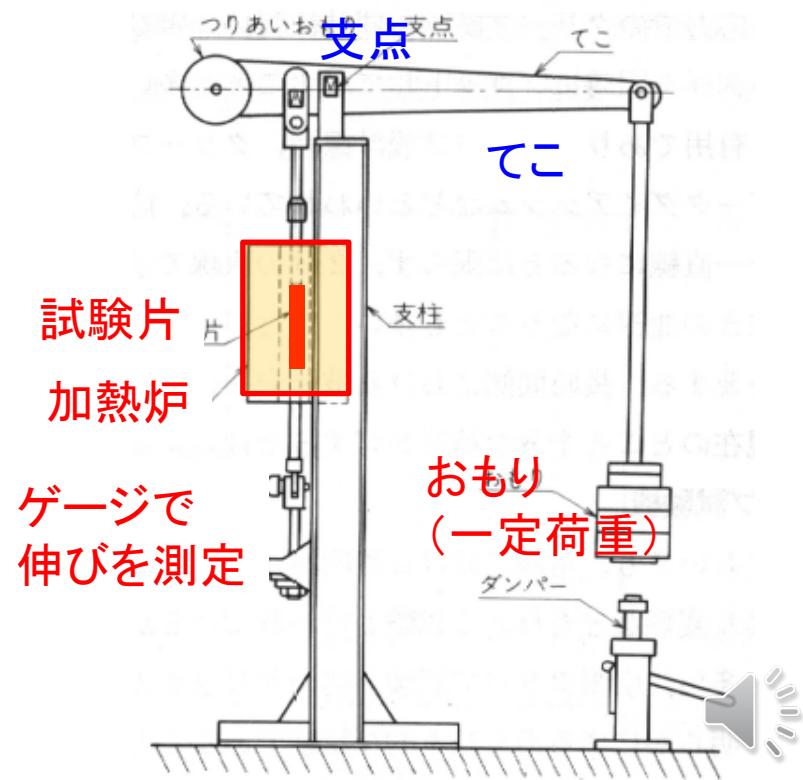
担当: 鎌田

●クリープ(高温での強度現象)

一定温度で一定荷重が加わった状態が
続くとき、時間の経過とともに変形し破壊



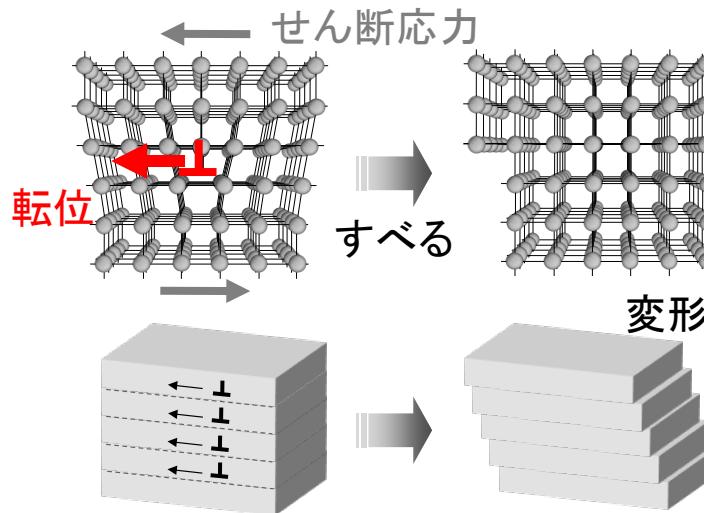
<http://www.nims.go.jp/chikara/column/creep.html>



● 材料の変形と転位(簡単に)

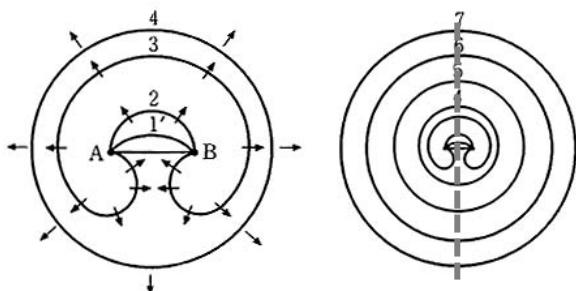
変形

転位のすべり、双晶変形
粒界すべり、拡散クリープ



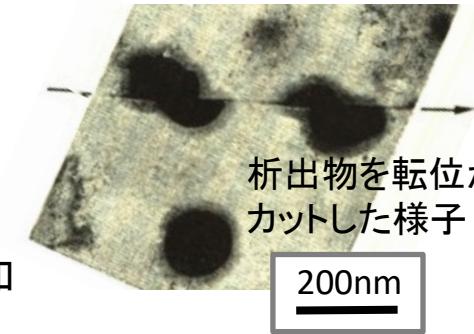
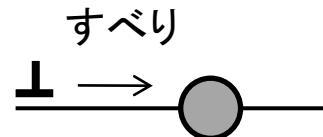
増殖

(塑性変形時)



同符号の
転位は反発

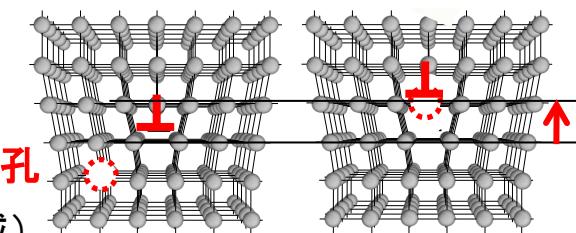
低温 ($T \ll$ 融点)



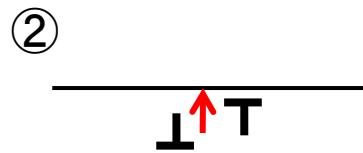
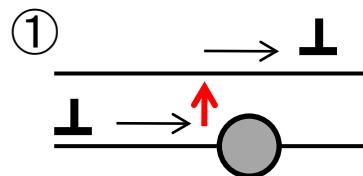
障害物(析出物、他の転位)
で妨害され、降伏応力が増加

高温の場合

空孔濃度: 増
(S : 増, $G = H - TS$: 減)



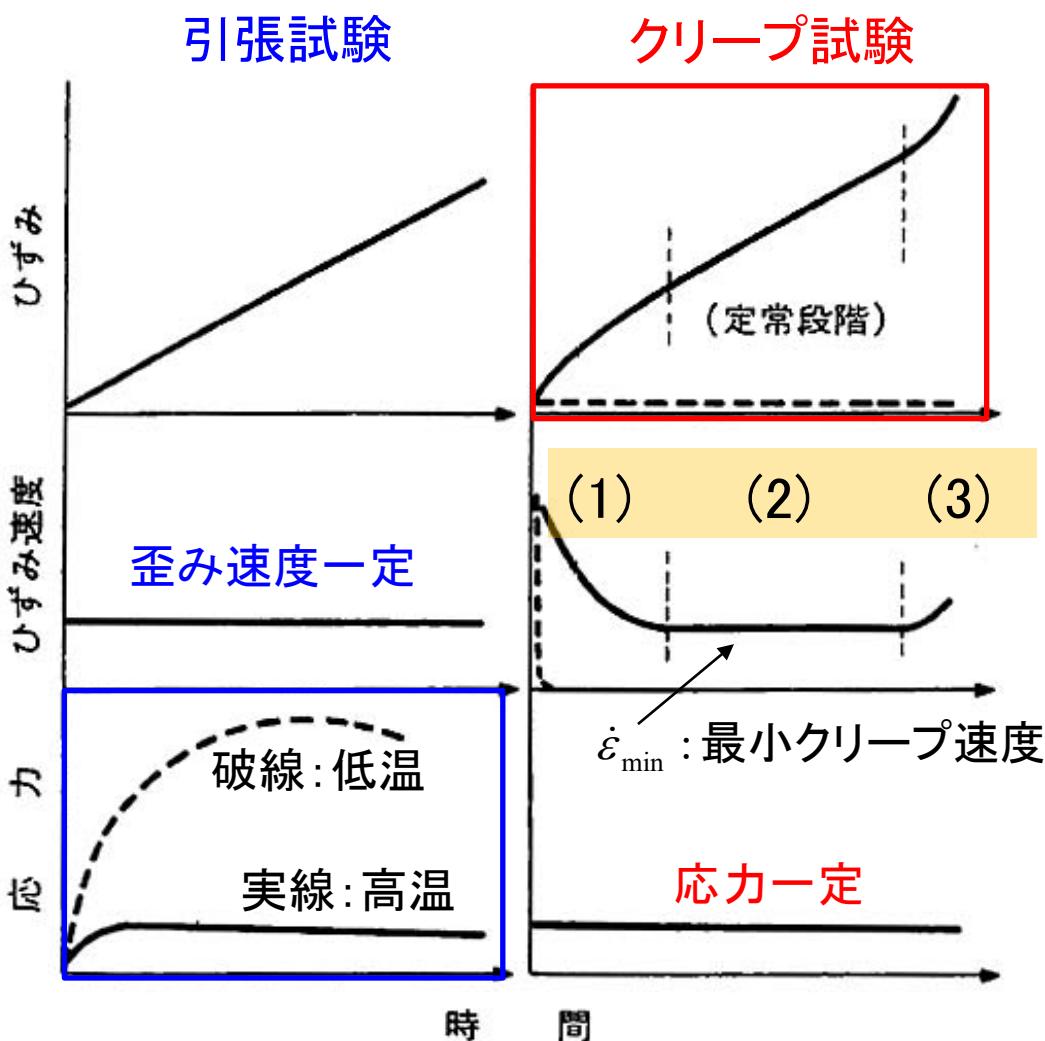
転位の
上昇運動



異符号の転位



●引張試験との比較



高温域($T > 0.4 \sim 0.5 T_m$):
拡散による回復が起こり、一定応力のもとでも歪み ε が増加。

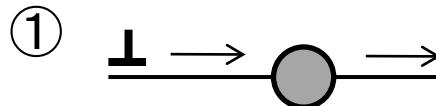
- (1) **遷移クリープ** (1次クリープ)
外力の負荷による加工硬化の段階で転位が増殖し絡み合い、転位の運動が阻止される
- (2) **定常クリープ** (2次クリープ)
転位密度がある程度まで増加すると、加工硬化と回復が釣り合う
- (3) **加速クリープ** (3次クリープ)
回復がより進み、試験片に局所的なくびれが生じ、破壊に至る



変形機構 (応力・温度で異なる)

高応力: ①転位すべり

拡散の助けなしに、外力と熱振動で転位が障害物を越える

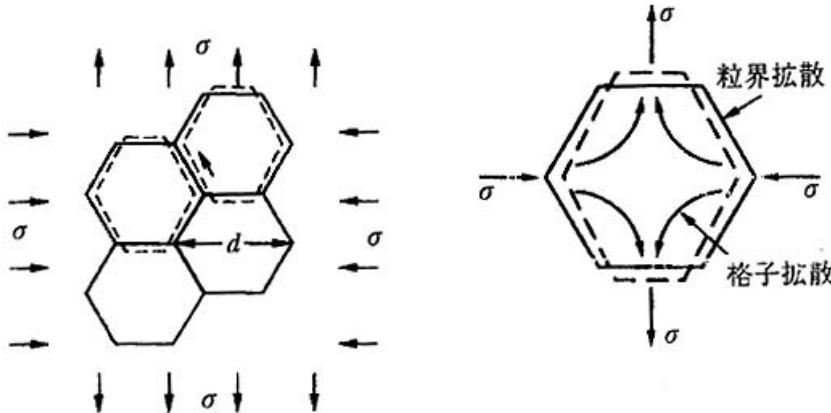


高温: ②転位クリープ

上昇運動による転位の合体消滅で材料は軟化、変形が継続

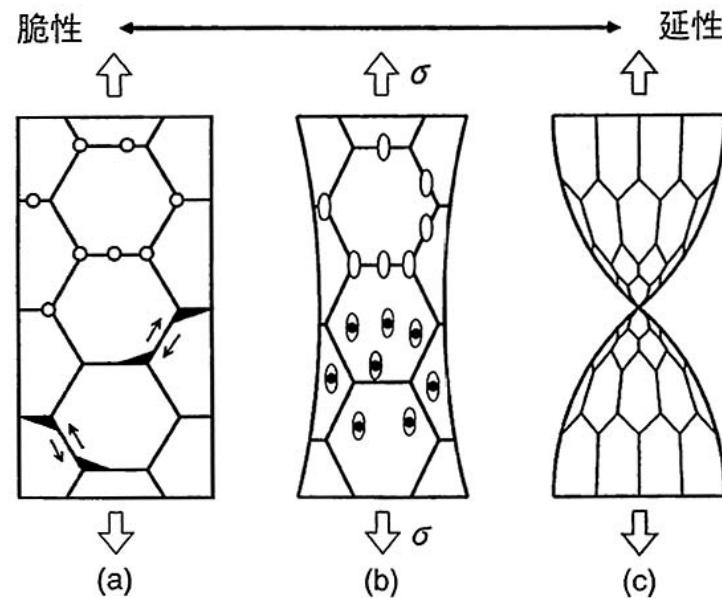
低応力: ③拡散クリープ

原子や空孔の拡散で変形



破壊機構

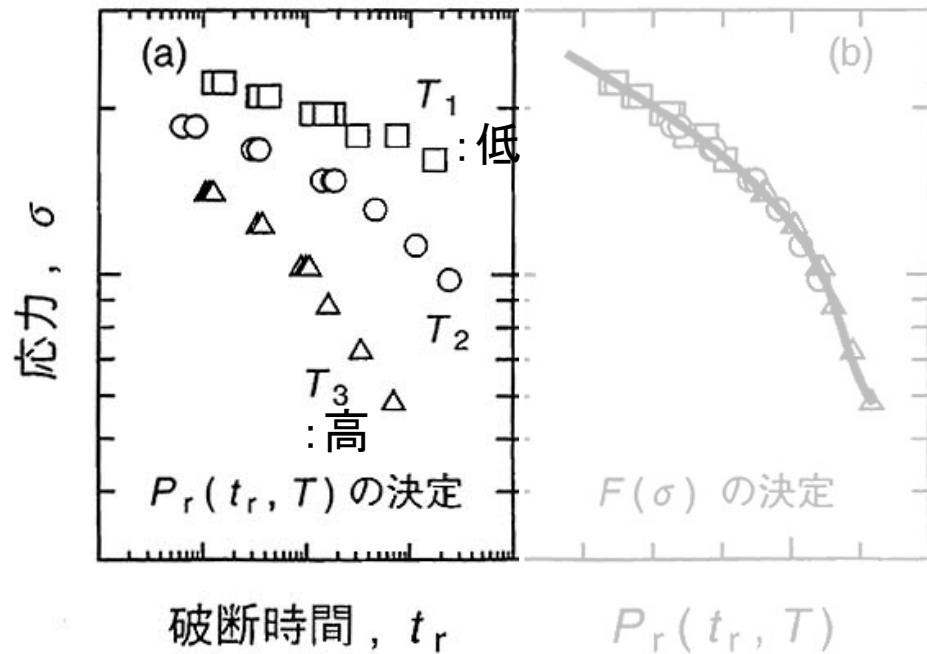
高温変形時の代表的な破壊様式



- (a) キャビティの成長・合体およびくさび型き裂による**粒界破壊**
- (b) 粒界および粒内キャビティの粒内変形による成長
- (c) **ラップチャ一**(100%の断面収縮を示す延性破断)



● 破断時間 t_r (温度・応力で異なる)をどう推定?



● 時間-温度パラメータ(TTP)法

$P_r(t_r, T)$ を使って T の違いを補償し、 t_r が σ のみの関数 $F(\sigma)$ で表現できると考える。

例: ラーソンミラー(LM)パラメータ

$$P_r = T(C + \log t_r) \quad (C: 15 \sim 25)$$

クリープ速度 $\dot{\varepsilon}$ の温度依存性

アレニウス則 $\dot{\varepsilon} = A \exp\left[-\frac{Q}{RT}\right]$

Q: クリープの活性化エネルギー

$$t_r \propto 1/\dot{\varepsilon} \rightarrow \frac{1}{t_r} = A' \exp\left[-\frac{Q}{RT}\right]$$

$$\log t_r = -\log A' + \frac{\log e}{R} \cdot Q \cdot \frac{1}{T}$$

$$T(C + \log t_r) = \frac{\log e}{R} \cdot Q \equiv P_r(t_r, T)$$



問:S590鋼のLarson-Millerデータを用い、
800°C(1073K)で100MPaの応力下にある
部材の破断寿命を予測せよ。

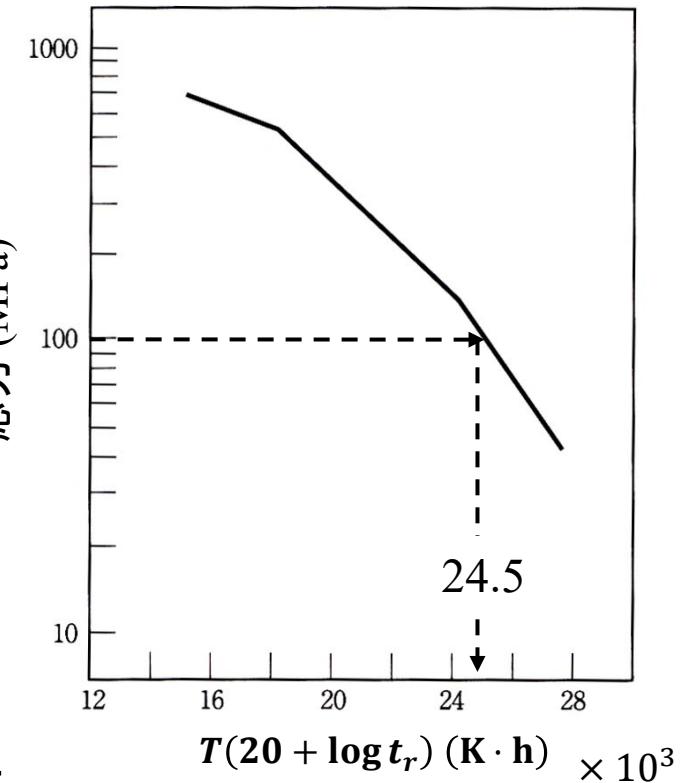
$$T(20 + \log t_r) = 24.5 \times 10^3$$

$$1073(20 + \log t_r) = 24.5 \times 10^3$$

$$20 + \log t_r = 22.83$$

$$t_r = 676 \text{ h} = 28.2 \text{ days}$$

NIMS(物質・材料研究機構)
長時間クリープ試験の実施…最適なTPP法の提示



| (例) | 主要成分 | 規格名 | NIMS データシート No. | 温度範囲 | 最適 外挿法 | 最適応力次数 | |
|-----------|----------------------|-----------------|-----------------------|-----------|-----------|----------|-----------|
| | | | | | | 全 ヒート | 個別 ヒート |
| 炭素鋼 | 0.2 C | STB 410 | 7 B(1992) | 400-500°C | LM | 3 | (2~5) |
| | 0.3 C | SB 480 | 17 B(1994) | 400-500°C | OSD | 1 | (2~4) |
| フェライト鋼 | 0.5 Mo | STBA 12 | 8 B(1991) | 450-550°C | OSD | 3 | (3) |
| | High Strength Steel | (Class 590 MPa) | 25 B(1994) | 400-550°C | OSD | | (3~4) |
| | 1.3 Mn-0.5 Mo-0.5 Ni | SBV 2 | 18 B(1987) | 450-550°C | MH | 5 | (4~5) |
| | 0.5 Cr-0.5 Mo | STBA 20 | 20 B(1994) | 450-600°C | MH | 4 | (3~4) |
| | 1 Cr-0.5 Mo | STBA 22 | 1 B(1996) | 500-650°C | MH | 5 | (5) |
| | 1 Cr-1 Mo-0.25 V | ASTM A 470-8 | 9 B(1990) | 500-650°C | MH | 4 | (4~5) |
| | 1.25 Cr-0.5 Mo-Si | STBA 23 | 2 B(2001) | 500-650°C | MH | | (5) |
| | 2.25 Cr-1 Mo | STBA 24 | 3 B(1986) | 450-650°C | MH | 2 | (4~5) |
| | 5 Cr-0.5 Mo | STBA 25 | 12 B(1992) | 500-650°C | OSD | 3 | (3~5) |
| | 9 Cr-1 Mo | STBA 26 | 19 B(1997) | 550-700°C | LM | | (2~3) |
| SUS 403-2 | 12 Cr | SUS 403-2 | 13 B(1994) | 450-600°C | OSD | 3 | (3~5) |
| | 12 Cr-1 Mo-1 W-0.3 V | SUH 616-B | 10 B(1998) | 500-650°C | MH | | (3~5) |

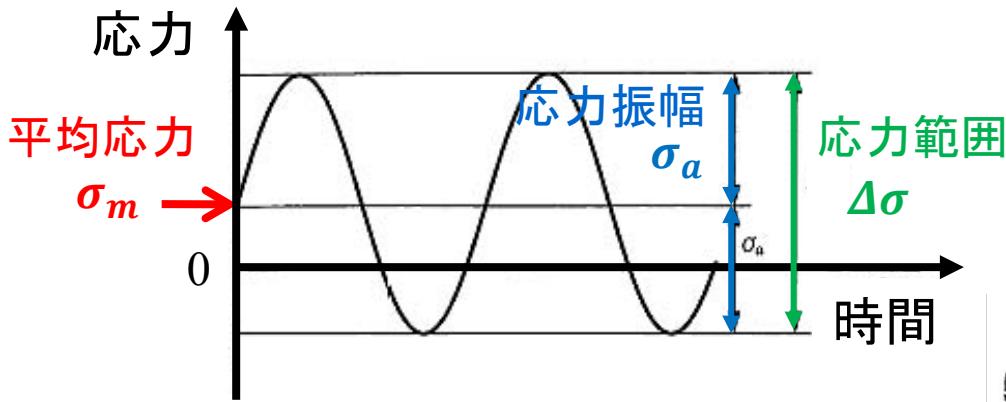
LM : Larson-Miller
OSD : Orr-Sherby-Dorn
MH : Manson-Halsted
MS : Manson-Succop

●疲労 引張強度以下の小さな荷重の繰り返しで破壊

荷重の発生…機械的負荷、油圧、電磁力

応力形式…軸荷重、回転曲げ、平面曲げ、ねじり

応力制御、ひずみ制御



S-N曲線 (定応力疲労試験)

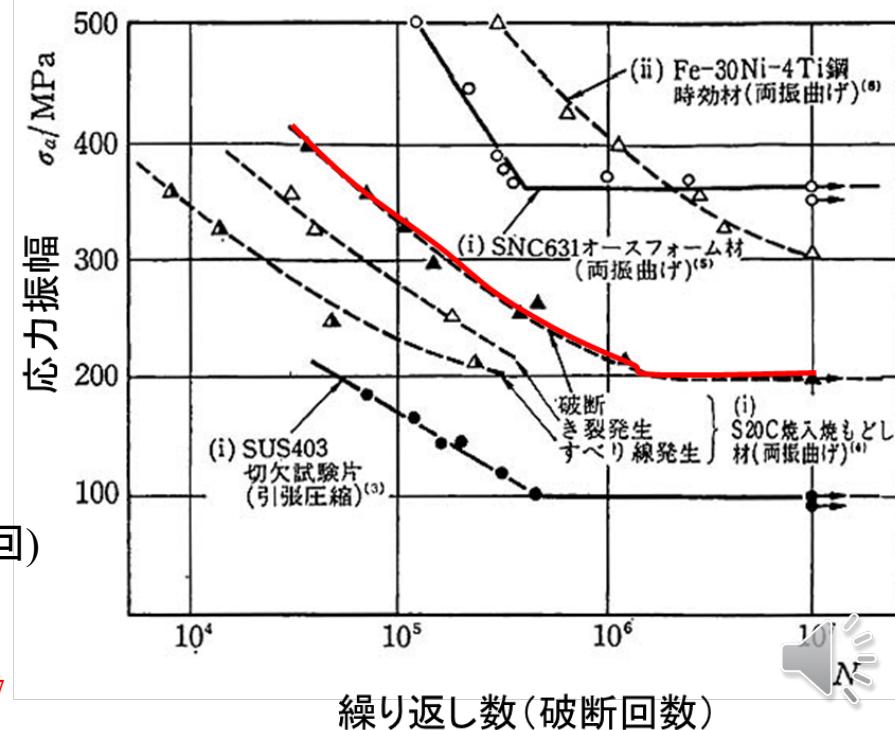
応力振幅と破断回数の関係

10⁷回の繰り返しに耐える
最大の応力振幅: **疲労限度**

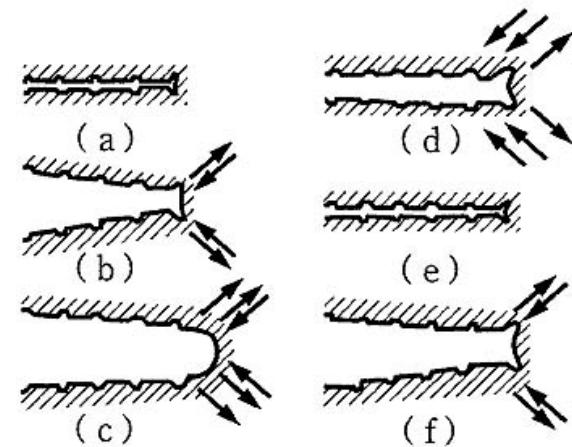
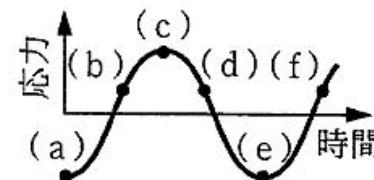
多くの鉄鋼材料: あり

Al合金など非鉄金属: ない

10Hz(1秒間に10回)
1hour 3.6×10^4
1day 8.6×10^5
1month 2.6×10^7



●ストライエーションの形成と破面解析



→ 1サイクルに対応した縞模様を残す

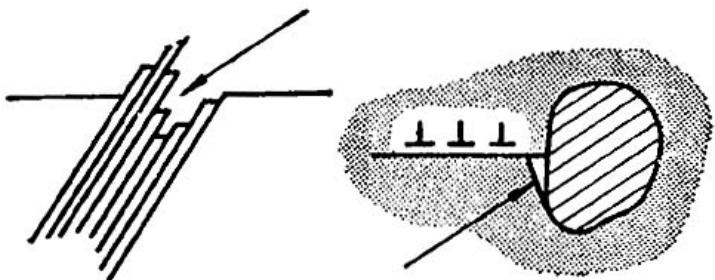
御巣鷹山JAL機墜落事故(1985年)



ストライエーションの解析 → 圧力隔壁の修理ミスによる疲労破壊



●疲労破壊の機構…き裂の発生と成長



(a) PSB

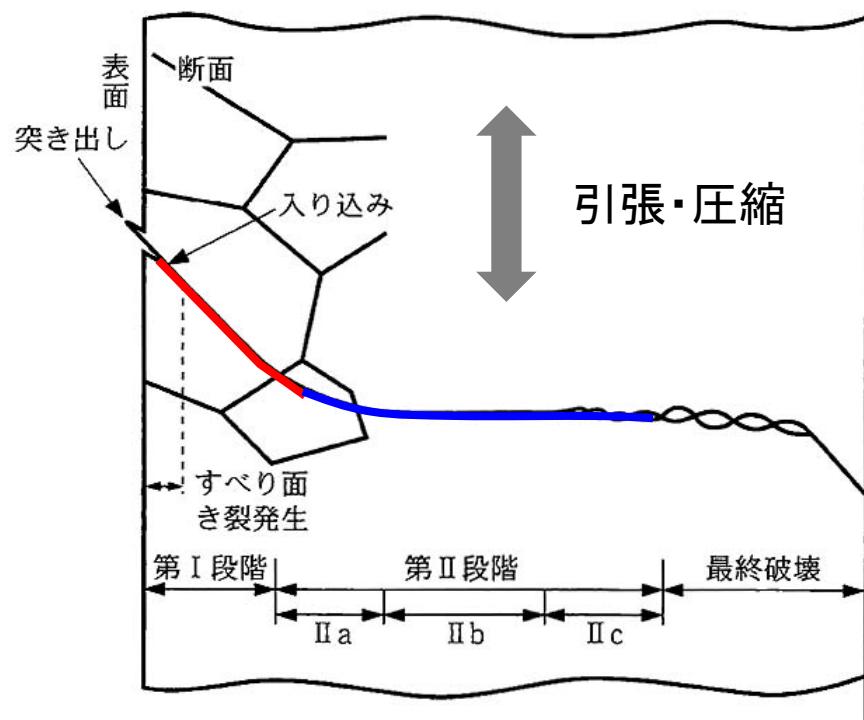
(b)-1 介在物

(b)-2 粒界

(a) 表面の突出し・入り込み
固執すべり帯 (PSB : persistent slip band)
→応力集中→微小き裂発生

(b)(c) 旧オーステナイト粒界、非
金属介在物、粒界析出物など組
織的に不均一なところ
→転位の集積→微小き裂発生

(参)発生時期:全寿命の5~30%程度



第 I：表面からすべり面に沿った疲労き裂
(1結晶粒程度)

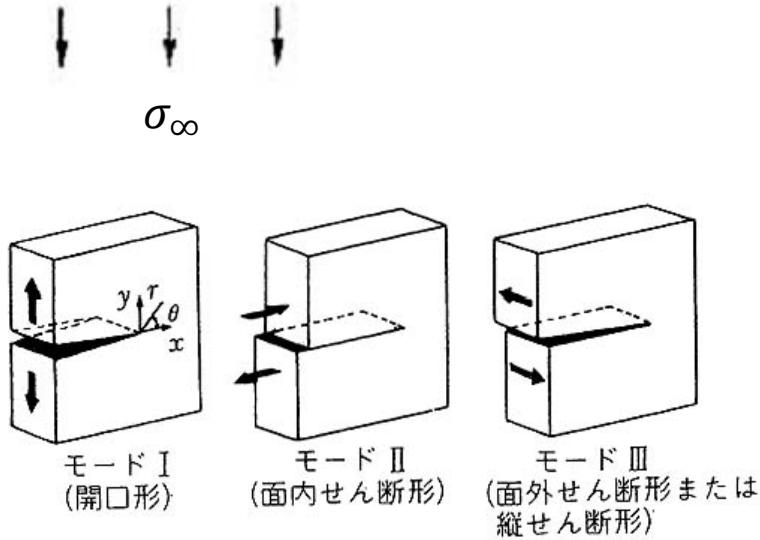
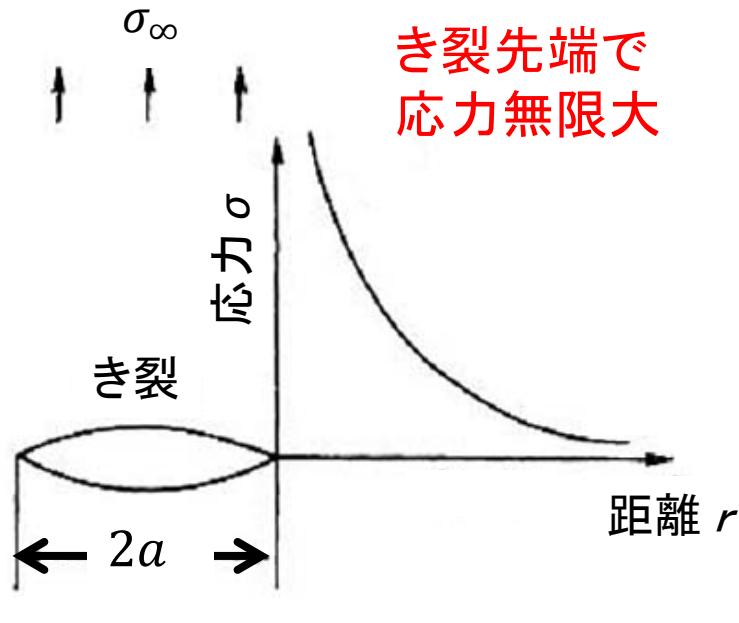
第 IIa：き裂先端の応力集中が高くなり、
複数のすべり系ですべりが活動
すべり面を交互に変更しながら進行

第 IIb：主応力の最大方向と垂直に進展
ストライエーションの形成

第 IIc：き裂の進展の加速

成長期間:長い → き裂成長の評価:重要

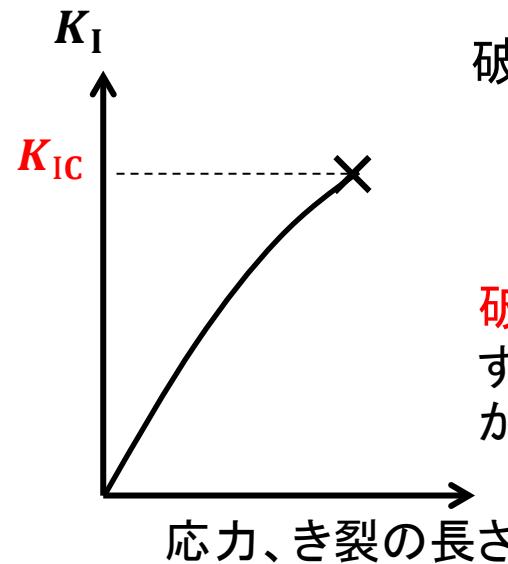
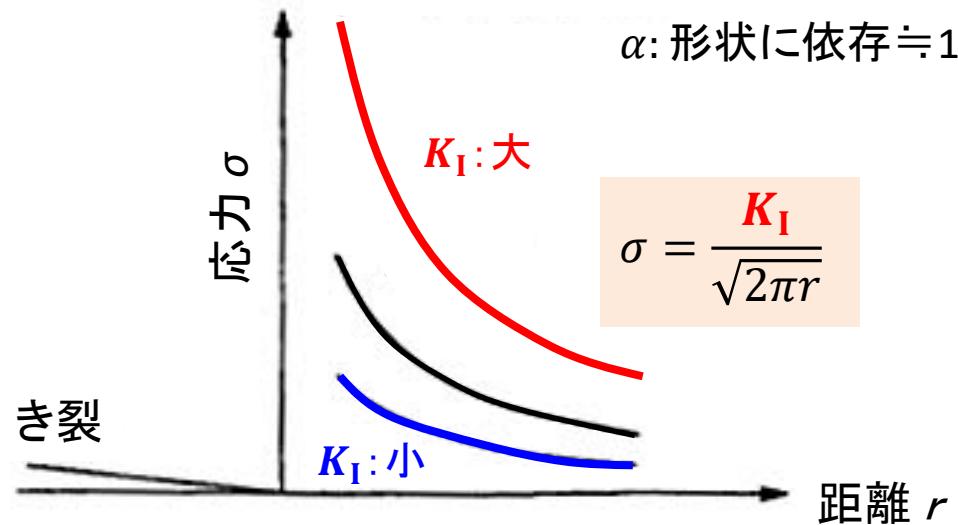
●破壊力学(き裂を扱う)



$$K_I = \alpha \sigma_\infty \sqrt{\pi a}$$

モードIの応力拡大係数

α : 形状に依存 ≈ 1



破壊非性: 材料内に存在するき裂から新たに割れが進展する際の抵抗



● 疲労き裂成長の破壊力学的取扱い

$$K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$$

α : 形・場所で決まる定数 ≈ 1
 a : き裂の大きさ

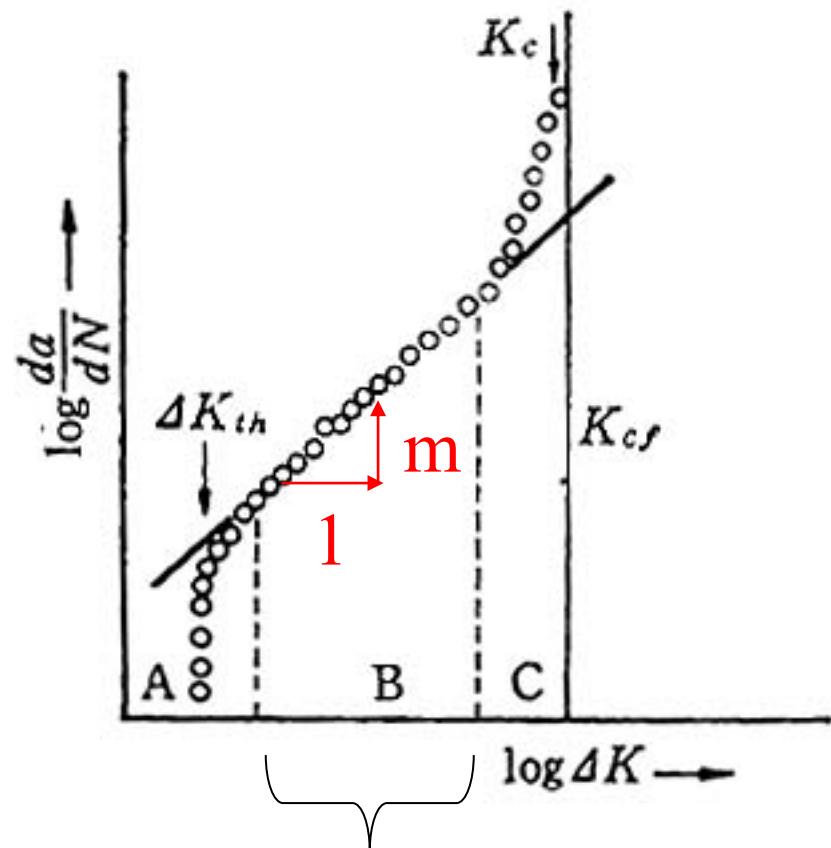
$$\begin{aligned}\Delta K &= K_{\max} - K_{\min} \\ &= \alpha \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} - \alpha \sigma_{\min} \sqrt{\pi a}\end{aligned}$$

応力拡大係数 K と、
き裂成長速度 da/dN との関係(経験式)

Paris則

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m$$

A, m : 定数



ストライエーション形成が
き裂成長の支配的破壊機構



破断回数 N_f 、パリス則、破壊靱性値 K_C 、初期き裂の長さ a_i の関係

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m = A(\alpha \Delta \sigma \sqrt{\pi a})^m = A\alpha^m (\Delta \sigma)^m (\pi a)^{m/2}$$

$$\Delta K = \alpha \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad K_c = \alpha \sigma_{max} \sqrt{\pi a_f} \rightarrow a_f = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{\alpha \sigma_{max}} \right)^2 \quad a_f : \text{破断直前のき裂長さ}$$

$$N_f = \int_0^{N_f} dN = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{A\alpha^m (\Delta \sigma)^m (\pi a)^{m/2}}$$

$$= \frac{1}{A\alpha^m (\Delta \sigma)^m (\pi)^{m/2}} \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{a^{m/2}} = \frac{1}{A\alpha^m (\Delta \sigma)^m (\pi)^{m/2}} \cdot \frac{a_f^{-m/2+1} - a_i^{-m/2+1}}{-m/2 + 1}$$

問:一定振幅(0~180MPa)で一軸疲労が生じている軟鋼の板($a_i = 0.5\text{mm}$ 、 $\alpha = 1.12$ 、 $K_C = 100\text{MNm}^{-3/2}$)は何サイクルで破断するか?以下のパリス則が成立するとする。

$$\frac{da}{dN} (\text{m/cycle}) = 6.9 \times 10^{-12} (\Delta K)^3 (\text{MNm}^{-3/2})$$

$$a_i = 5 \times 10^{-4} (\text{m}), \quad a_f = \frac{1}{\pi} \left(\frac{100}{1.12 \times 180} \right)^2 = 7.8 \times 10^{-2} (\text{m})$$

$$N_f = \frac{1}{(6.9 \times 10^{-12}) 1.12^3 (180)^3 (\pi)^{3/2}} \cdot \frac{(7.8 \times 10^{-2})^{-3/2+1} - (5 \times 10^{-4})^{-3/2+1}}{-3/2 + 1}$$

$$= \frac{(7.8 \times 10^{-2})^{-1/2} - (5 \times 10^{-4})^{-1/2}}{-157.4 \times 10^{-6}} = 261000 \text{ (cycles)}$$

き裂の長さ・形がわかれれば、破壊の時期を予測できる
→ 次回:き裂の非破壊検査



①-③：組織・構造, ④-⑥：化学組成・結合状態

⑦ 熱分析 ⑧ ⑨ 力学特性(引張・硬さ・衝撃・破壊革性試験)

⑩：クリープ試験・疲労試験

●クリープ試験…高温・荷重一定で変形・破断

時間温度パラメータ(例:LM)で整理したデータベース

→ 寿命予測

●疲労試験…繰り返し荷重で変形・破断

S-N曲線、ストライエーション

$K_c + \text{パリス則}(A, m) + a_i \rightarrow$ 寿命予測

次回は ⑪：非破壊検査

参考書：

金属材料試験マニュアル 日本規格協会

演習・材料試験入門 砂田 大河出版

金属の強度と破壊 黒木・大森・友田 森北出版

高温強度の材料科学、丸山・中島 内田老鶴園 1997

寿命・余寿命予測と材料 日本材料科学会編 裳華房 2006

