

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: 衝撃試験・破壊靱性試験



第9回

担当: 鎌田

●材料の強さとは？

硬い(硬さ)

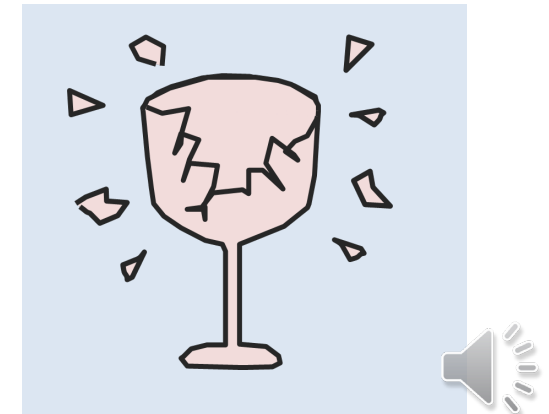
粘り強い(靱性) ⇔ 脆い(脆性)

- ・ダイヤモンドは非常に硬いが脆い
- ・金属は粘り強く、ガラスは脆い

●構造用材料は、粘り強さが必要

→ 鉄に炭素を添加した鋼(はがね)

ところが、低温でガラスのように脆くなる



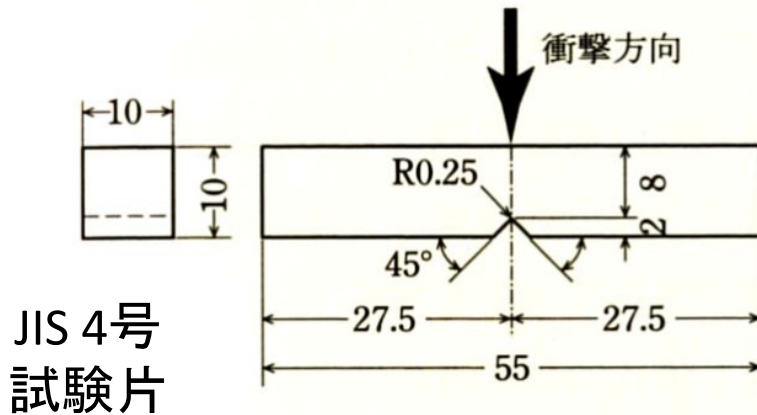
● 衝撃試験

常温で延性(大きな塑性変形後に破壊)を持っても、**低温で脆性破壊**(ほとんど変形せず破壊)する場合がある

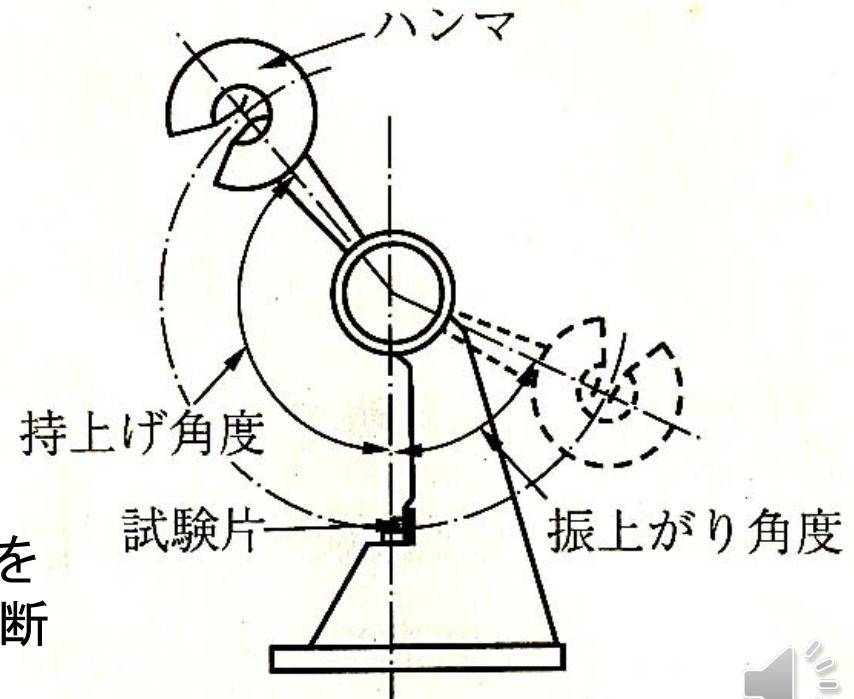
静的荷重には問題ない場合でも、**衝撃的荷重に対してもろい**場合がある

➡ **シャルピー**衝撃試験(Charpy impact test)

1901 : G.Charpy発表。簡便な試験法として、現在も広く利用。



V型の切欠き(またはU型)のある試験片を
支持台で支え、背面をハンマで打撃し破断



●吸収エネルギー

$$U = WR(\cos \beta - \cos \alpha) - U_0$$

ハンマ重量: W

ハンマの回転軸中心から重心までの距離: R

持ち上げ角: α 、振り上げ角: β

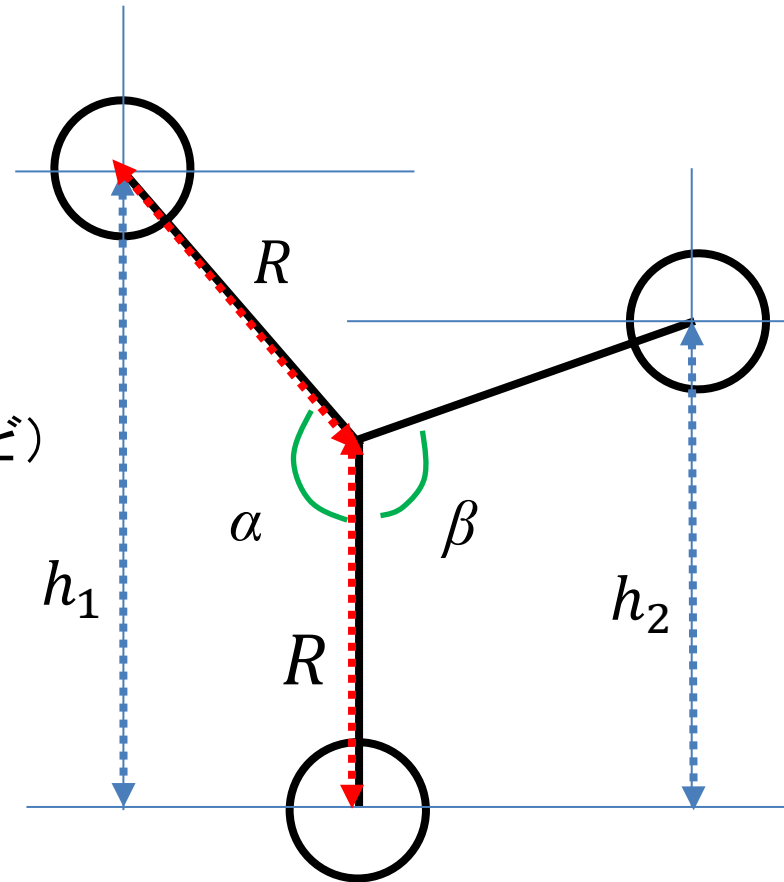
損失エネルギー: U_0 (軸受摩擦、空気抵抗など)

位置エネルギー: $Mgh = Wh$

$$h_1 = R + R \cos(\pi - \alpha) = R(1 - \cos \alpha)$$

$$h_2 = R + R \cos(\pi - \beta) = R(1 - \cos \beta)$$

$$h = \mathbf{h_1} - \mathbf{h_2} = R(\cos \beta - \cos \alpha)$$



●衝撃値: 吸収エネルギー $U(\text{J})$ を
切欠き部の断面積 $A(\text{cm}^2)$ で割った値 (J/cm^2)



●遷移温度

DBTT : Ductile-Brittle Transition Temperature

高温: **延性破壊**(ductile fracture)から

低温: **脆性破壊**(brittle fracture)に破壊形態が変化する温度

記号	定義	名称
$\sqrt{T_{rE}}$	吸収エネルギーの平均値に相当する温度	エネルギー遷移温度
$\sqrt{T_{rS}}$	脆性破面率が50%となる温度	破面遷移温度
$\sqrt{T_{r30}}$ $\sqrt{T_{r15}}$	吸収エネルギーが30ft-lb (41J), 15ft-lbになる温度	30ft-lb遷移温度 (15ft-lb)
$\sqrt{T_{rLE}}$	特定の横膨出量に対応する温度	横膨出遷移温度

フィート・ポンド 1ft-lb \div 1.356 J



●実験方法

- ・試験片を液槽or気槽内に入れ、試験片が試験温度になるまで**十分に冷却・加熱**。

○冷却・・・水＋氷

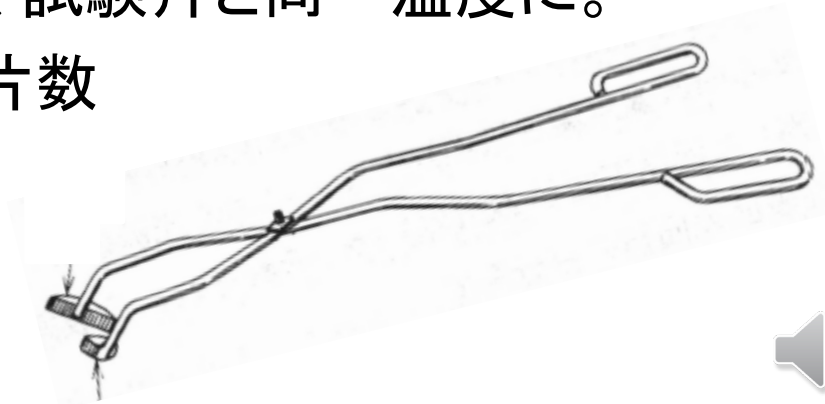
アルコール＋ドライアイス粒：0～-70℃

イソペンタン（液体窒素で冷却）：-70～-150℃

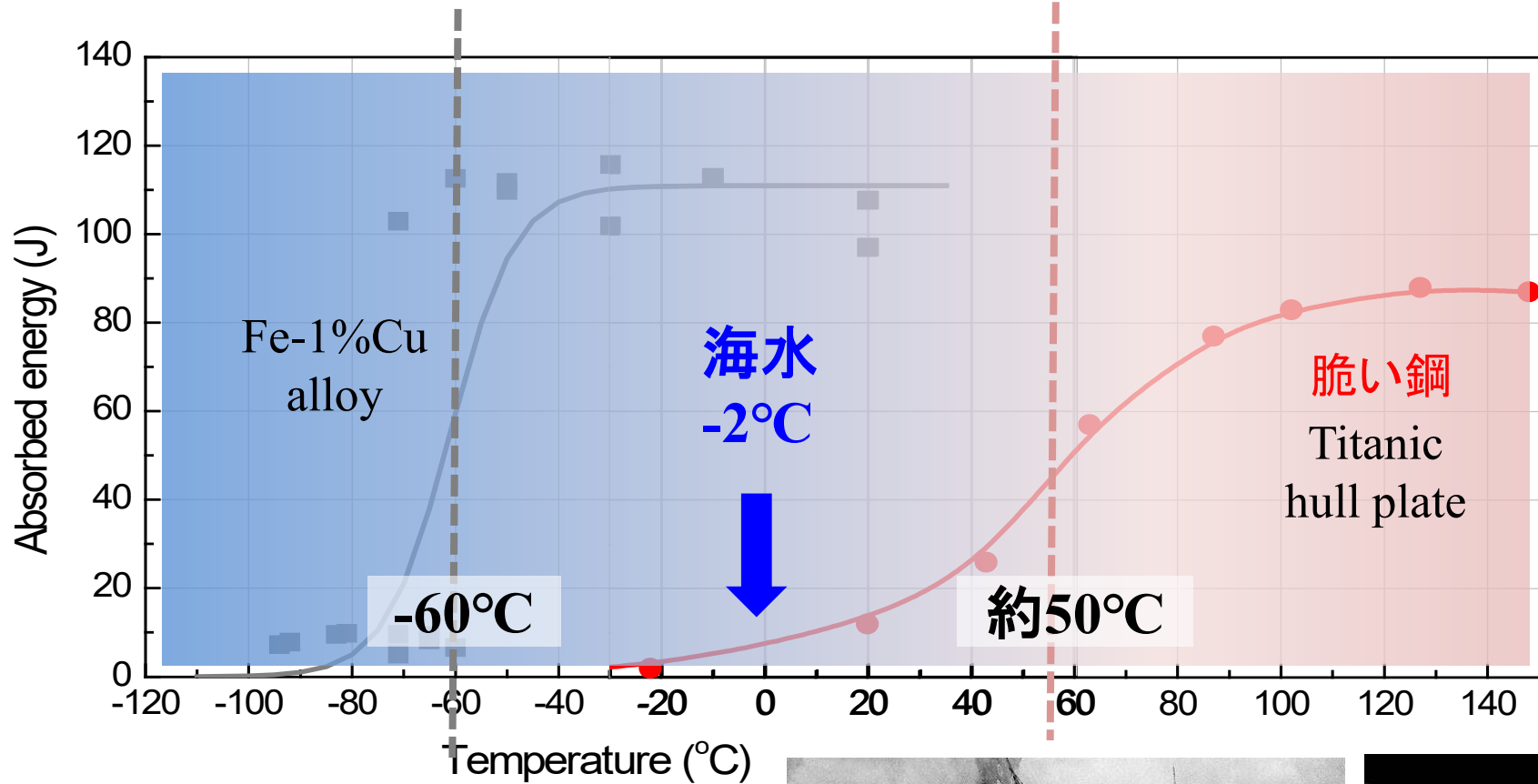
液体窒素：-196℃

○加熱・・・加熱炉、**オイルバス**

- ・槽内から試験片を衝撃するまでの時間：**5秒以内**（JIS）
- ・**試験片つかみ具も槽内に入れ**、試験片と同一温度に。
- ・衝撃値を決定するための試験片数
：通常、**1つの温度で3本**



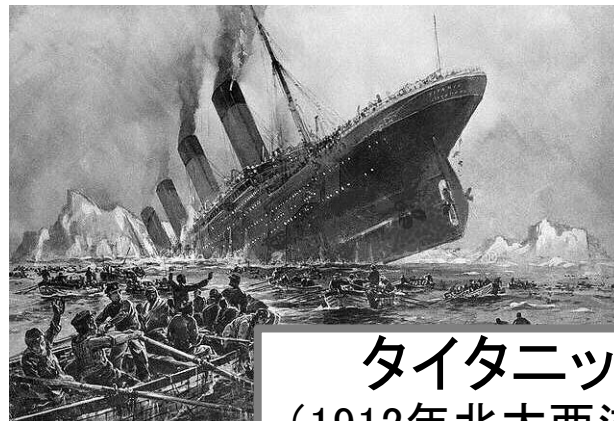
試験結果の例



BCC構造
...低温脆性

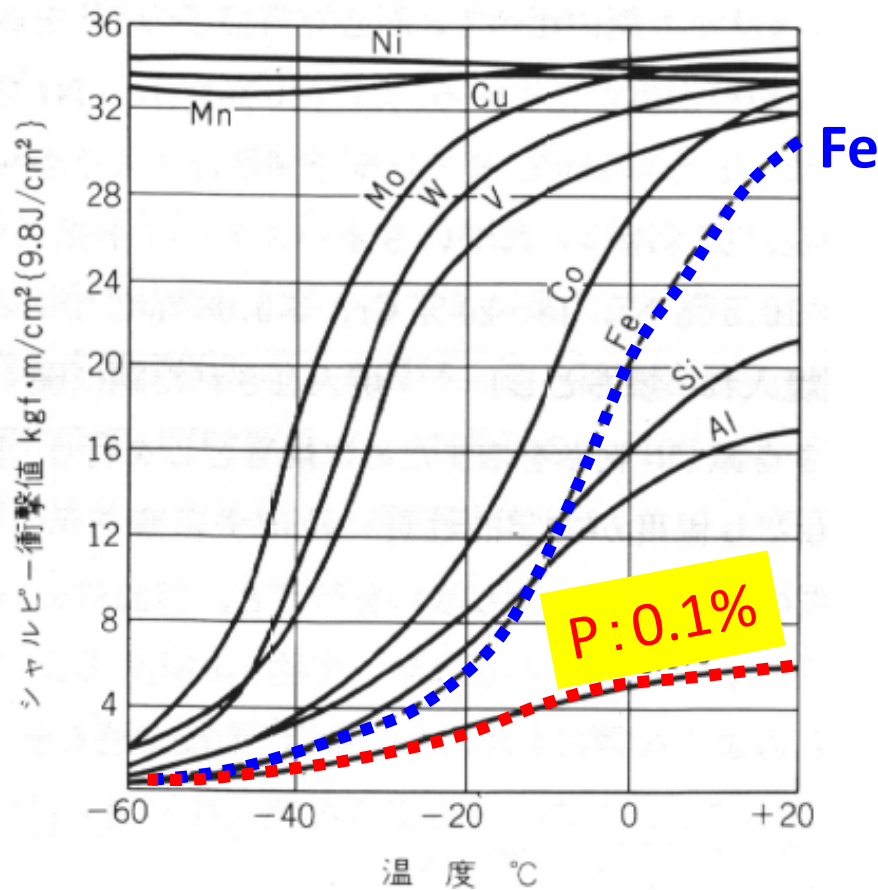
引用:

K. Felkins et al. JOM, 50 (1998) pp.12-18

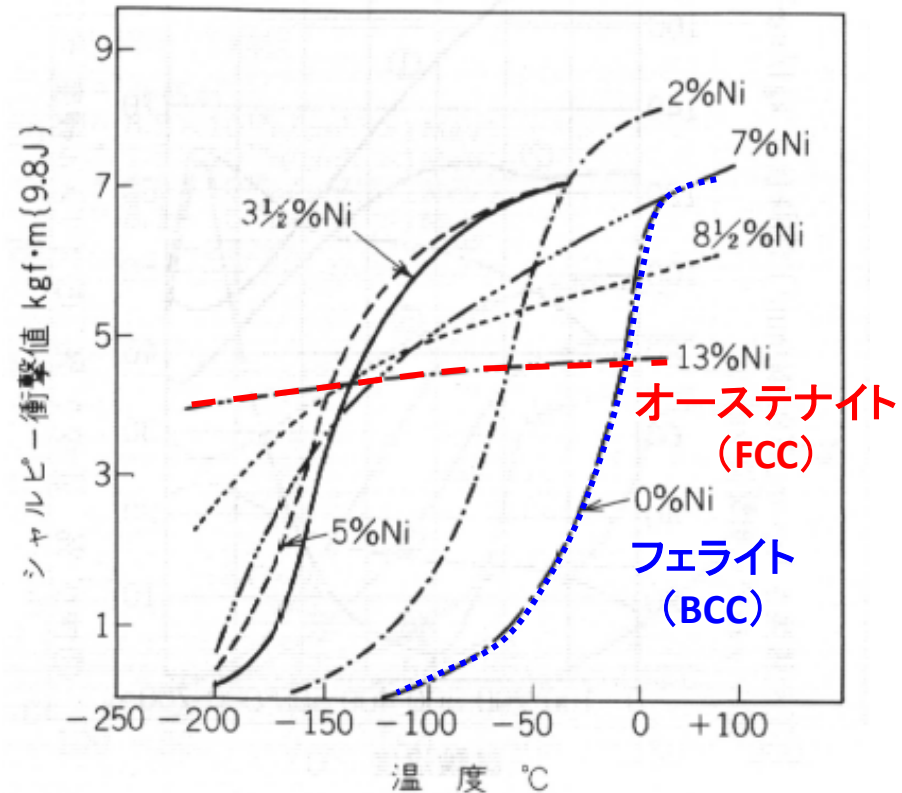


タイタニック号
(1912年北大西洋で沈没)



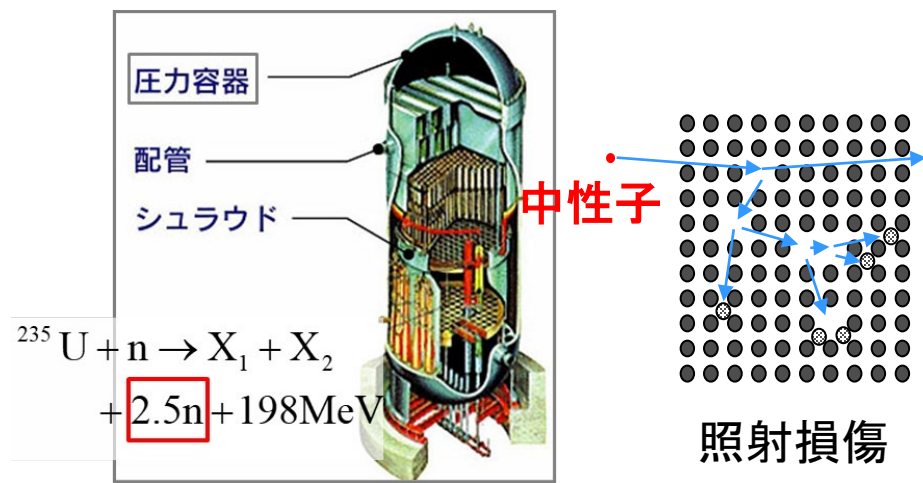
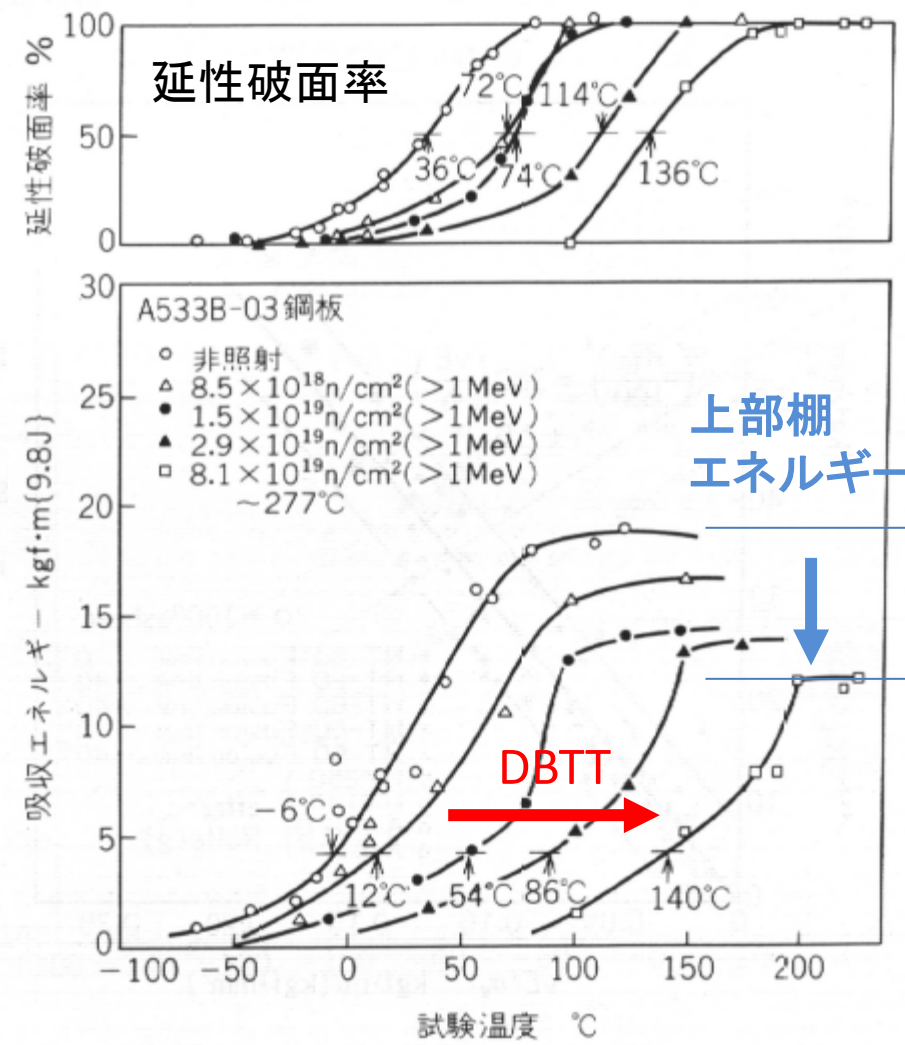
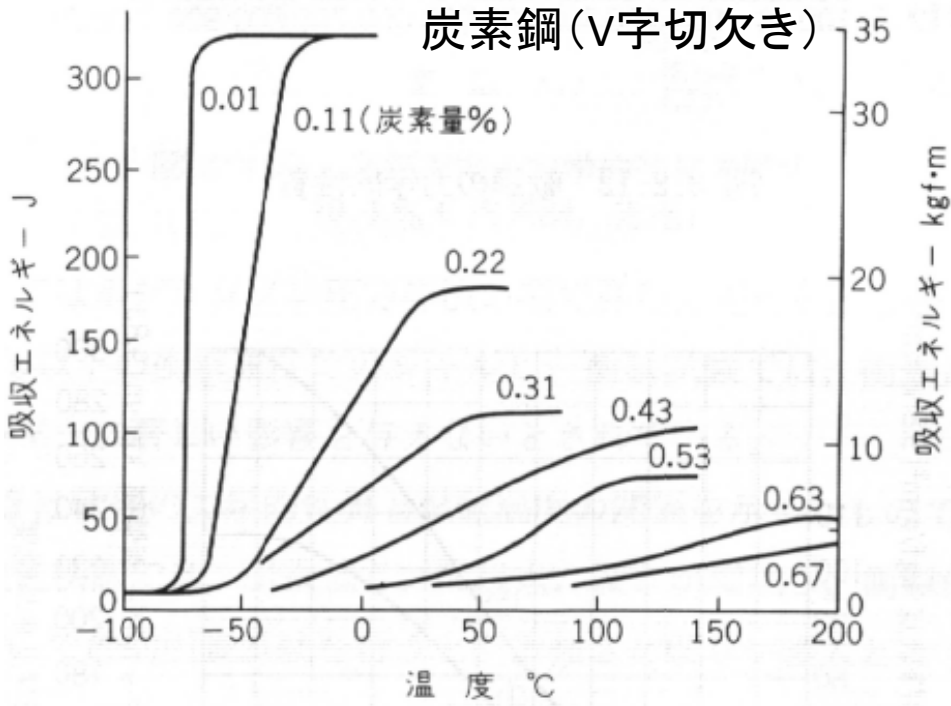


鉄の低温脆性に及ぼす
各種元素の影響
(Pのみ0.1%、他は1%)



鉄鋼のNi含有量と
遷移温度の関係

FCCは低温脆性がない

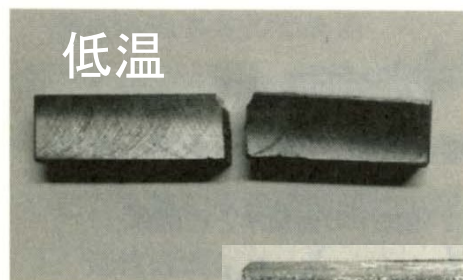


中性子照射した圧力容器鋼A533B鋼

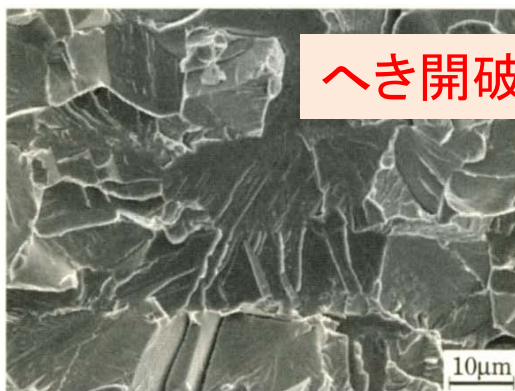
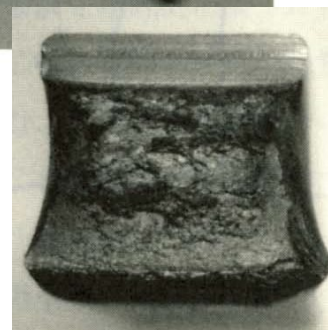
予め圧力容器の中に挿入しておいた試験片を定期的に取り出し、衝撃試験を実施

●破面解析：フラクトグラフィ(fractography)・・・破壊機構の情報

低炭素鋼の
シャルピー
試験

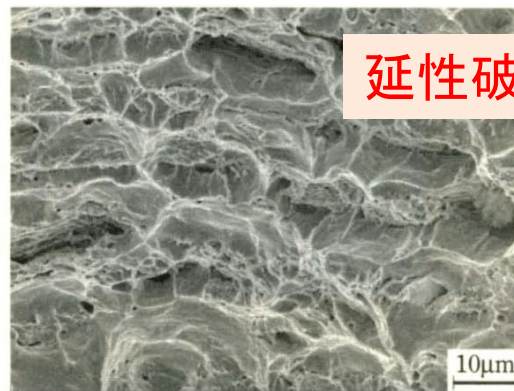


破断面の観察



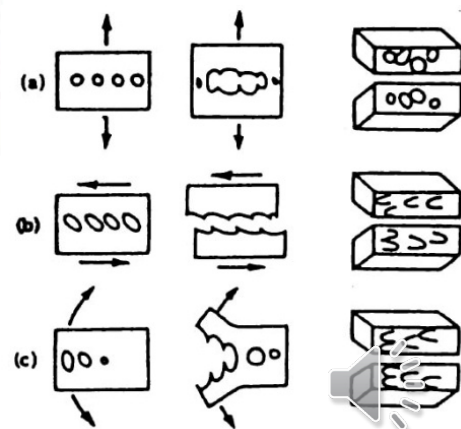
へき開破壊

リバーパターン
幾つかのへき開面が合流



延性破壊

くぼみ模様
(デンプル)

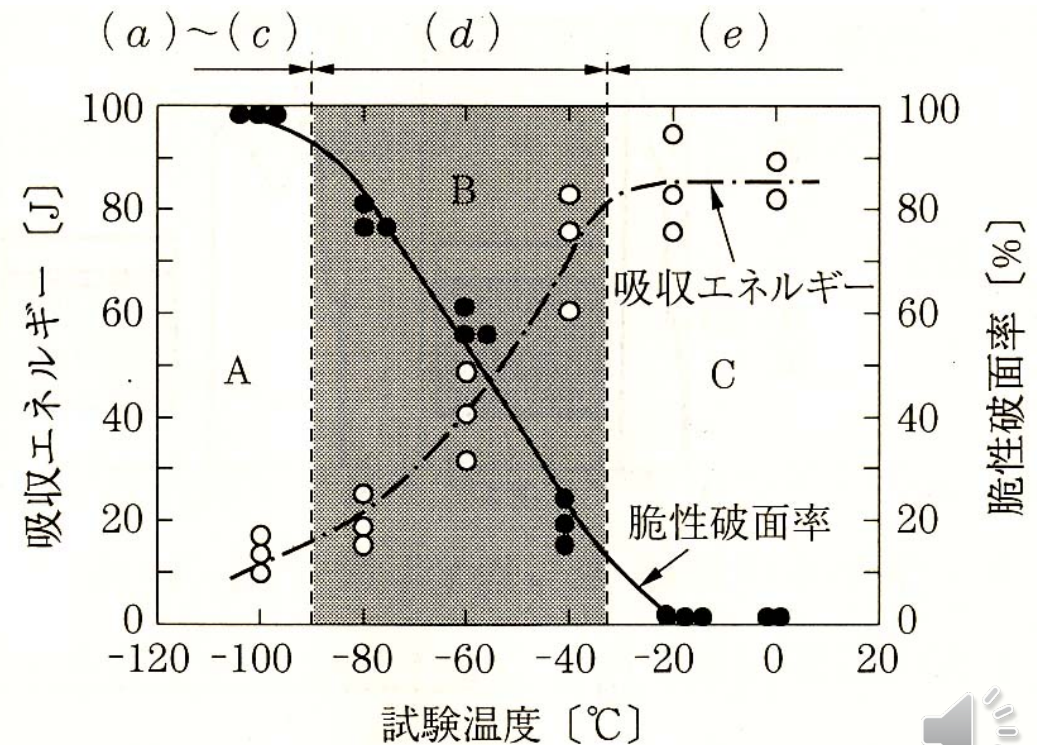
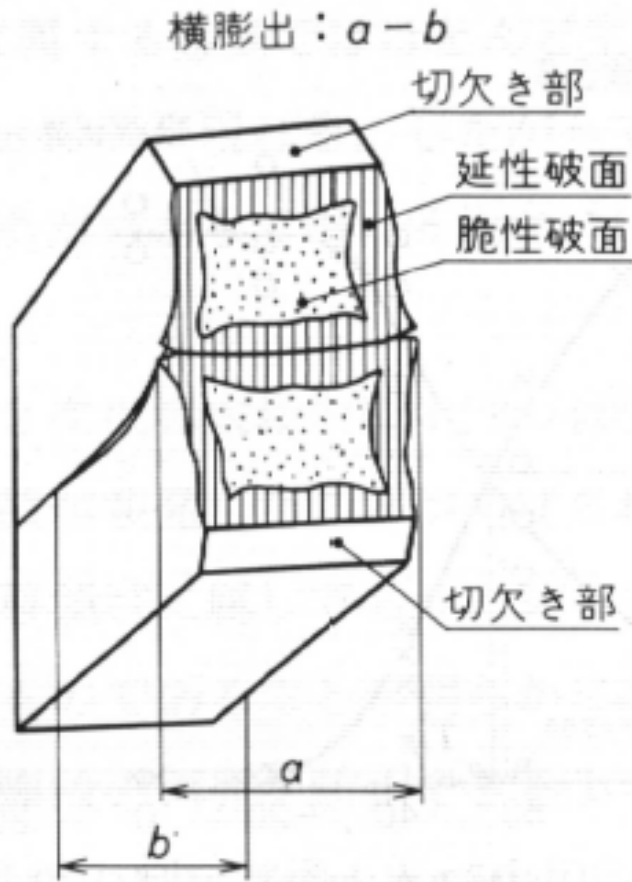


●脆性破面率(衝撃試験)

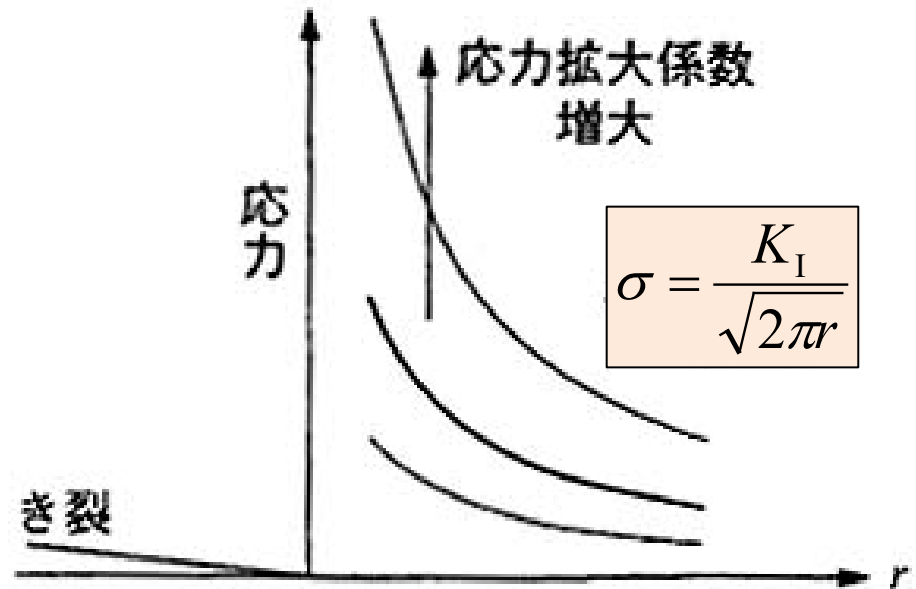
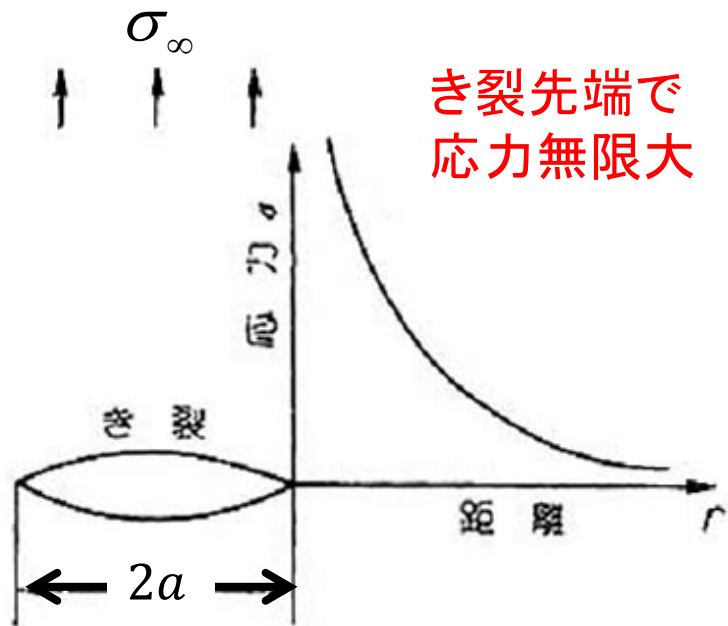
脆性破面率: $C / A \times 100$

C : 脆性破面面積

A : 破面全面積



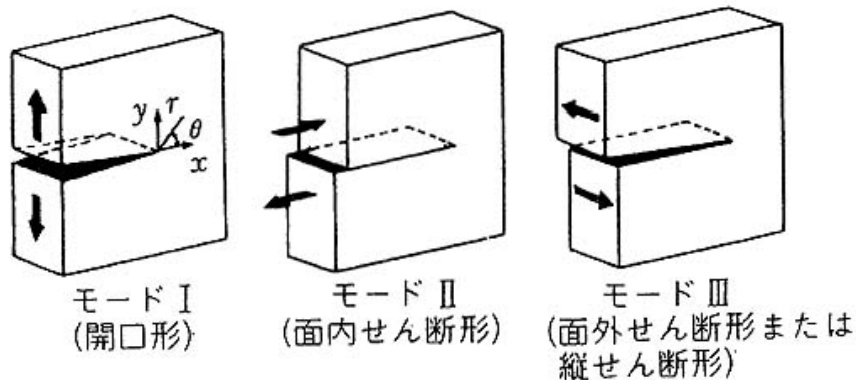
●破壊力学(き裂を扱う)



$$K_I = \alpha \sigma_{\infty} \sqrt{\pi a} \quad \alpha: \text{形状に依存}$$

モードIの応力拡大係数

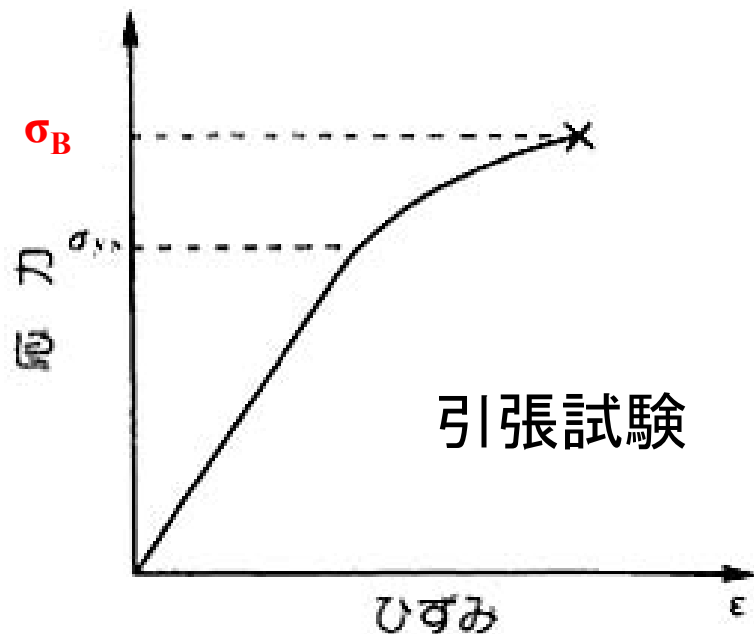
き裂近傍の応力が
高い状態 or 低い状態 を示す



K が同じ → 物体の形状や荷重負荷
状態が異なっても、き裂先端近傍の
応力状態は等しくなることを意味

材料力学

き裂がない

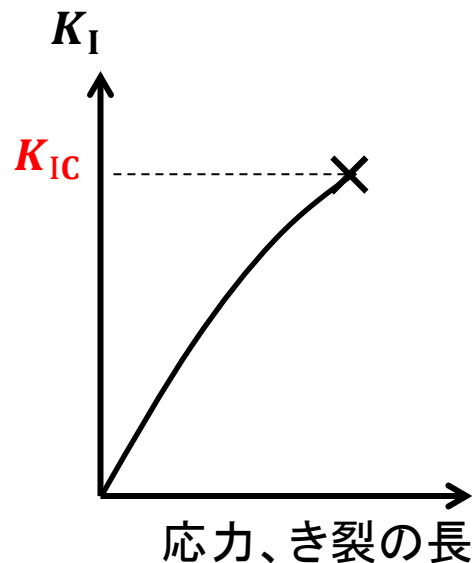
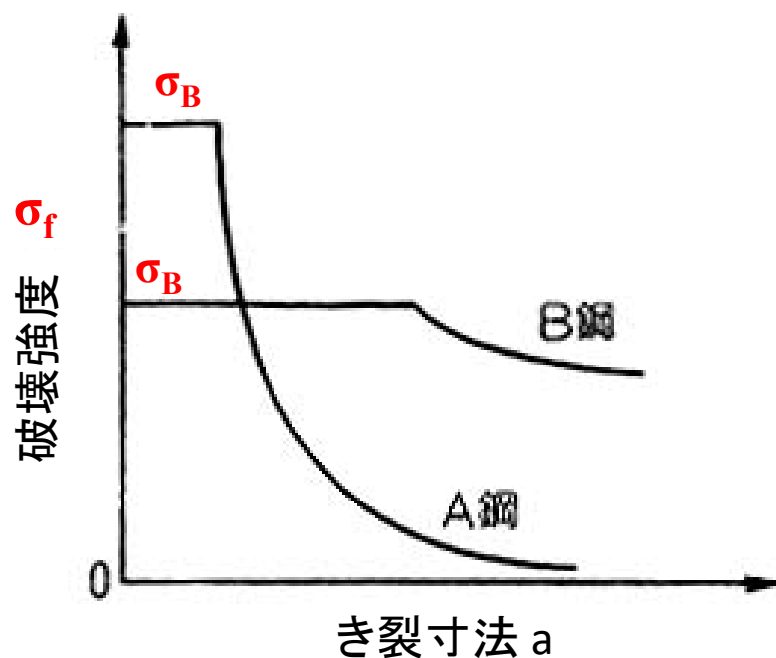


引張試験

破壊の条件: $\sigma \geq \sigma_B$

破壊力学

き裂を含む

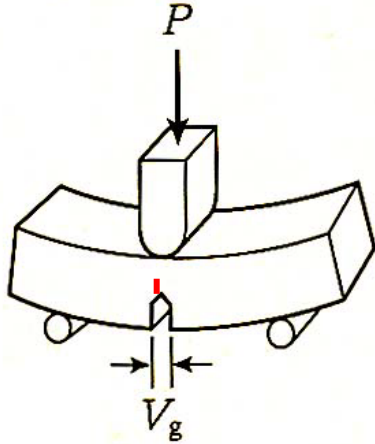


$$K_I \geq K_{IC}$$

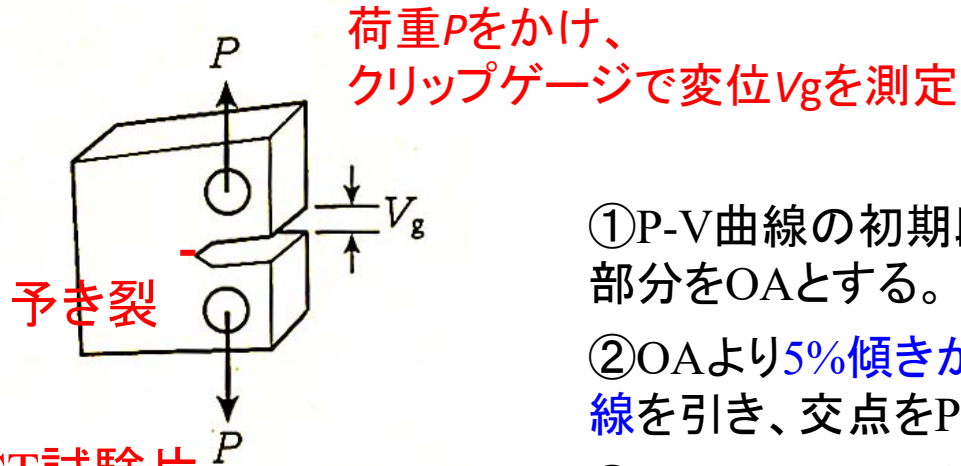
破壊靱性: 材料内に存在するき裂から新たに割れが進展する際の抵抗



●平面ひずみ破壊じん性(K_{IC})試験



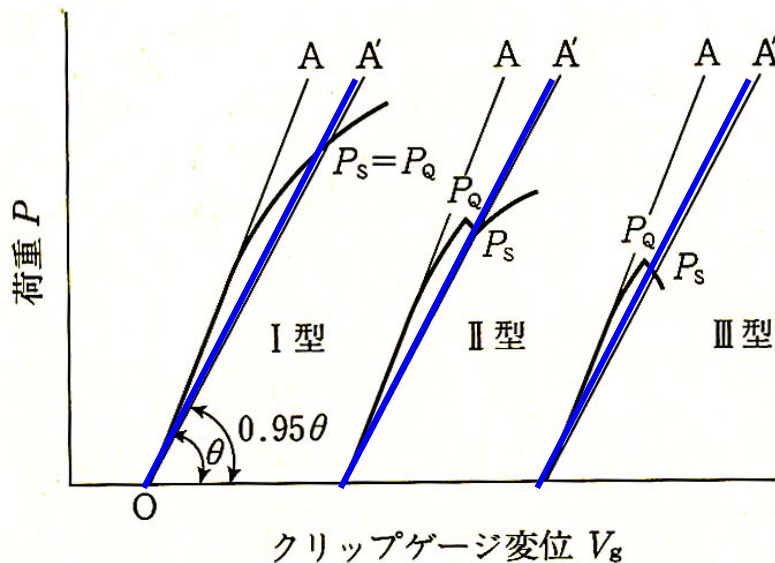
三点曲げ試験片
bend specimen



CT試験片
compact tension specimen

荷重 P をかけ、
クリップゲージで変位 V_g を測定

- ①P-V曲線の初期段階の直線部分をOAとする。
- ②OAより5%傾きが小さい直線を引き、交点を P_s とする。
- ③OAと OP_s の直線で挟まれるP-V曲線上の最高試験力を P_Q とする。
- ④ P_Q を用いて破壊靱性値: K_{IC} を算出する。



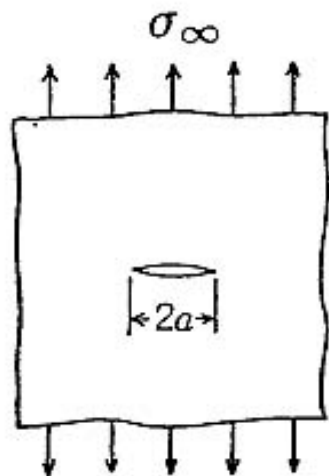
5%の勾配の減少

(き裂長さが2%程度進展)

・・・小型試験片の2%程度のき裂進展時の靱性は、十分寸法の大きな部材、試験片における破壊靱性にほぼ対応すると考える

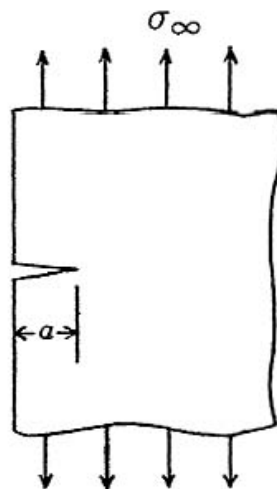


問 表面き裂が危険である点について、応力拡大係数の違いに基づき説明せよ。



$$\alpha = 1$$

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



$$\alpha = 1.1215$$

$$K_I = 1.1215 \sigma_{\infty} \sqrt{\pi a}$$

$$\left[\begin{array}{l} a \rightarrow 2a \\ K_I = 1.1215 \sigma_{\infty} \sqrt{2\pi a} \\ = \mathbf{1.586} \sigma_{\infty} \sqrt{\pi a} \end{array} \right]$$

約1.6倍高い値

問 アルミナとマルエージ鋼(高強度高靱性鋼)に応力500MPaが加わったとき、破壊に至る欠陥の大きさは？(ただし、 $\alpha=1$ とする)

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \geq K_{IC}$$



$$a \geq \left(\frac{K_{IC}}{\sigma} \right)^2 / \pi$$

$$a \geq \frac{\left(\frac{4MPa \cdot \sqrt{m}}{500MPa} \right)^2}{\pi} = 2.03 \times 10^{-5}$$

$$2a \geq \mathbf{40\mu m}$$

$$a \geq \frac{\left(\frac{90MPa \cdot \sqrt{m}}{500MPa} \right)^2}{\pi} = 0.0103$$

$$2a \geq \mathbf{2cm}$$

各種材料の破壊靱性値

材料	K_{IC} (MPa $\cdot\sqrt{m}$)
アルミナ(セラミックス)	4.0
ジルコニア(セラミックス)	6.0
シリコンカーバイド(セラミックス)	3.0
アルミ合金	35
マルエージ鋼	90
鋳鉄	20



①-③:組織・構造, ④-⑥:化学組成・結合状態

⑦ 熱分析 ⑧ 力学特性(引張・硬さ試験)

⑨:衝撃試験・破壊靱性試験

- シャルピー衝撃試験

- 延性脆性遷移温度、脆性破面率

- 破面解析 脆性破壊、延性破壊

- 破壊力学、応力拡大係数、破壊靱性値

- 平面ひずみ破壊靱性試験

次回は ⑩:クリープ試験・疲労試験

参考書:

金属材料試験マニュアル 日本規格協会

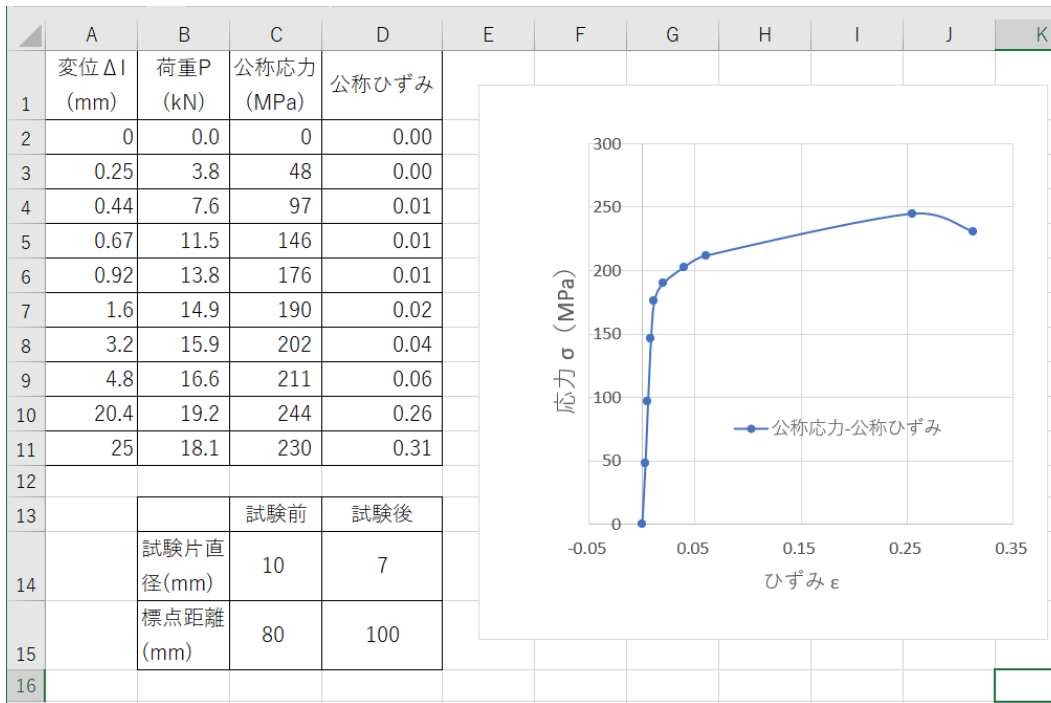
演習・材料試験入門 砂田 大河出版

金属の強度と破壊 黒木・大森・友田 森北出版

ミクロの傷を追う 岸・志波 丸善



6/11の課題の解答例



降伏応力(0.2%耐力で考える): 180MPa
 (弾性域でのデータに対し、
 0.2%ひずみの直線を平行に引いて交点から求める)
 引張強さ: 244MPa
 破断伸び: $(100-80)/100 \times 100 = 25\%$
 絞り: $(5^2\pi - 3.5^2\pi) / 5^2\pi \times 100 = 51\%$

