

# 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・破壊靭性試験

第9回



担当: 鎌田

## ●材料の強さとは?

硬い(硬さ)

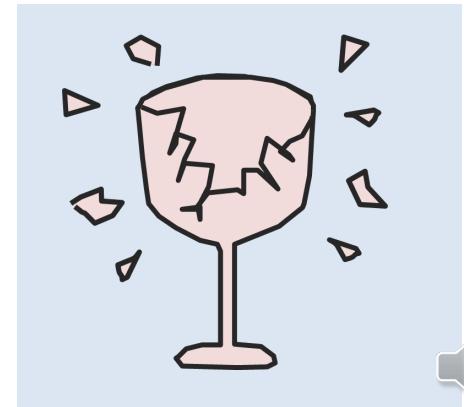
粘り強い(靭性) ⇔ 脆い(脆性)

- ・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



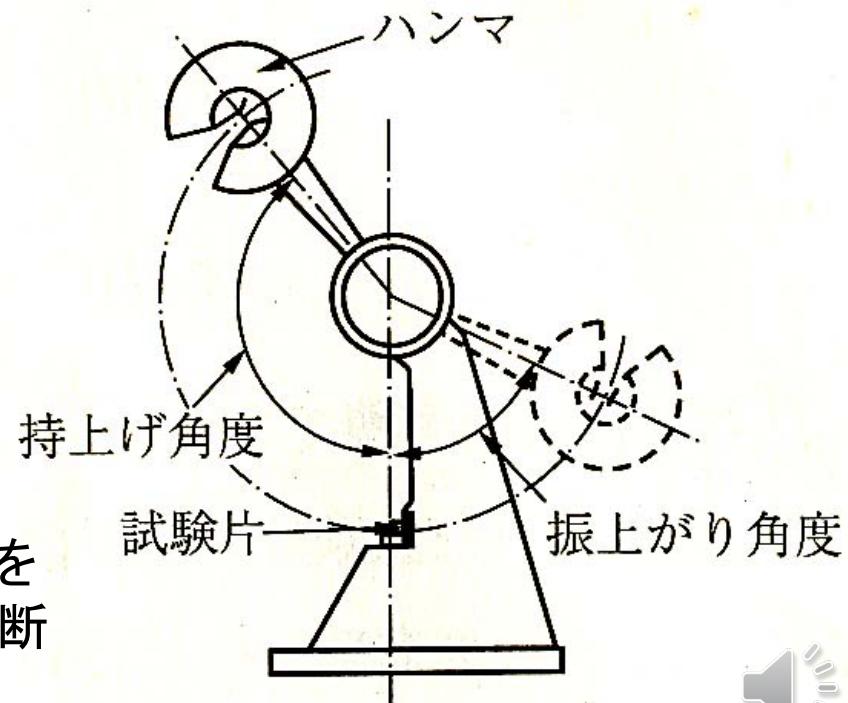
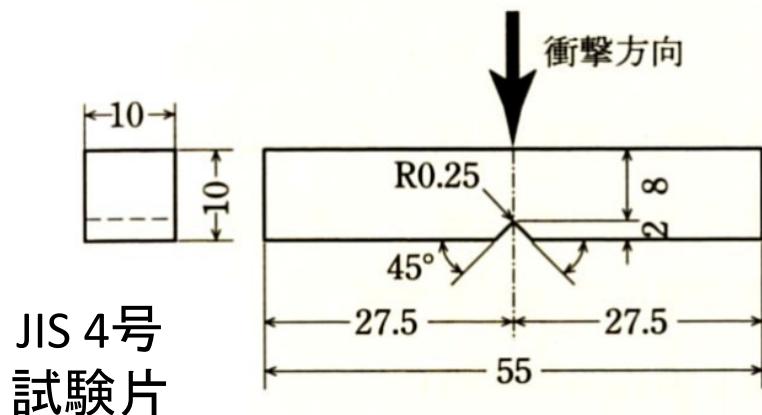
# ●衝撃試験

常温で延性(大きな塑性変形後に破壊)を持っていても、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:  $\alpha$ 、振り上げ角:  $\beta$

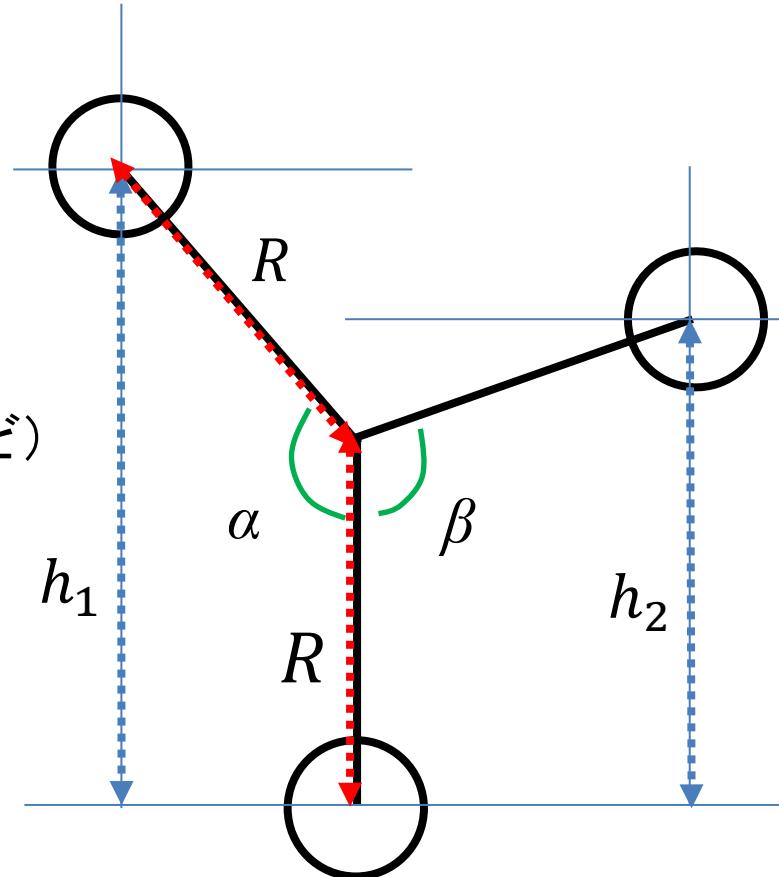
損失エネルギー:  $U_0$  (軸受摩擦、空気抵抗など)

位置エネルギー:  $Mgh = Wh$

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

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

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



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



## ●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
$\nu T_{rE}$	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
$\nu T_{rS}$	脆性破面率が50%となる温度	破面遷移温度
$\nu T_{r30}$ $\nu T_{r15}$	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)
$\nu T_{rLE}$	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 ≈ 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°C

イソペンタン(液体窒素で冷却):-70~ -150°C

液体窒素:-196°C

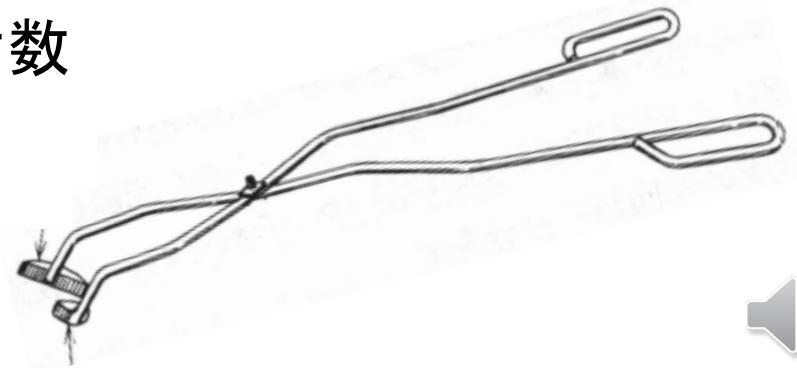
○加熱…加熱炉、オイルバス

- ・槽内から試験片を衝撃するまでの時間:5秒以内(JIS)

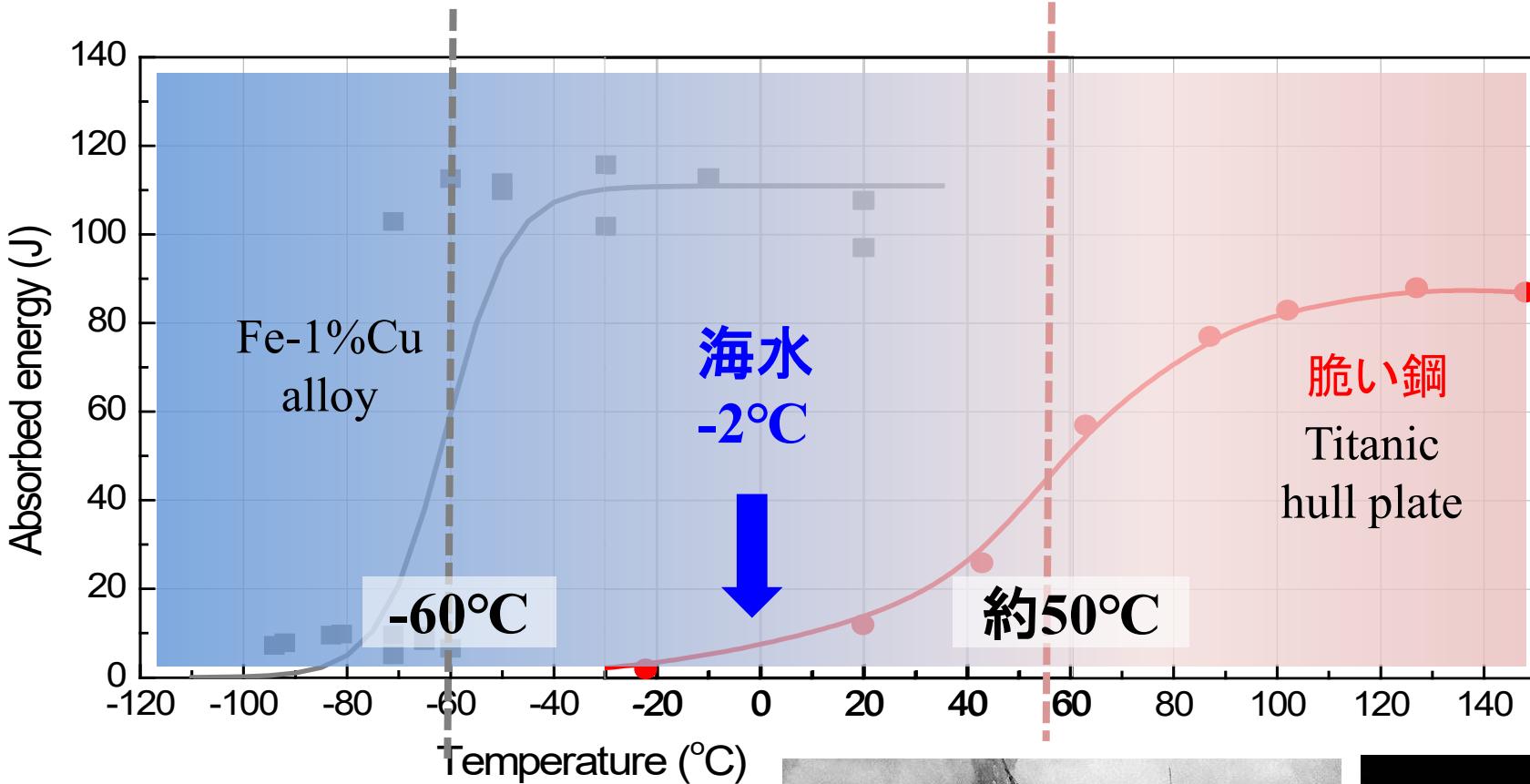
- ・試験片つかみ具も槽内に入れ、試験片と同一温度に。

- ・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

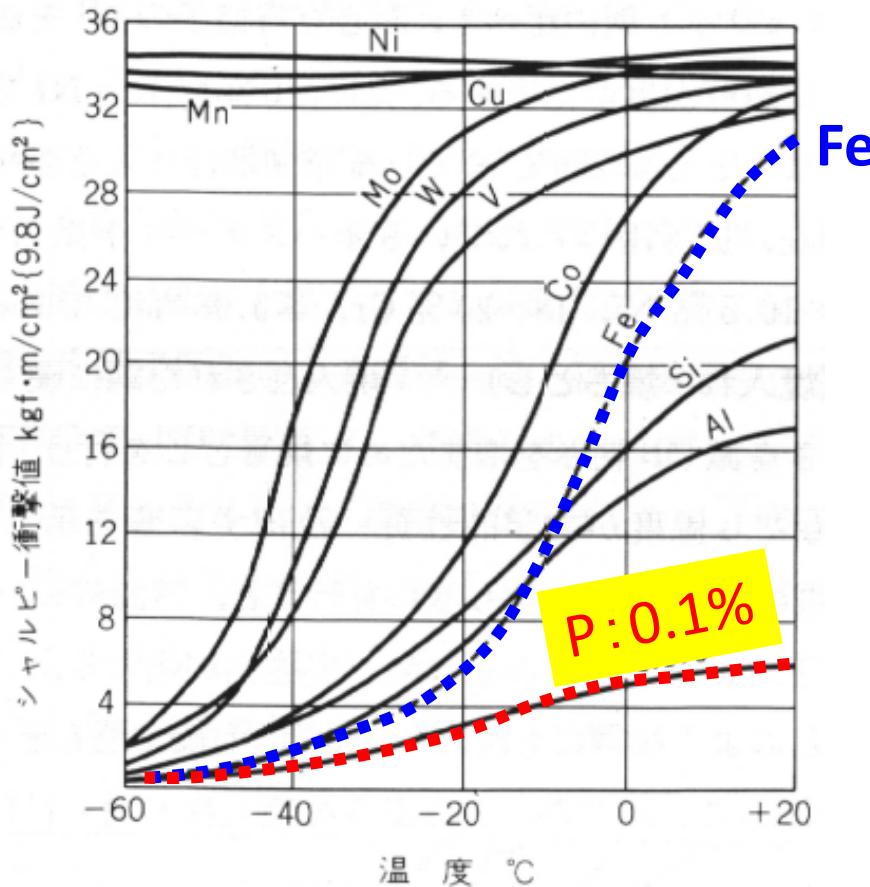
引用:

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

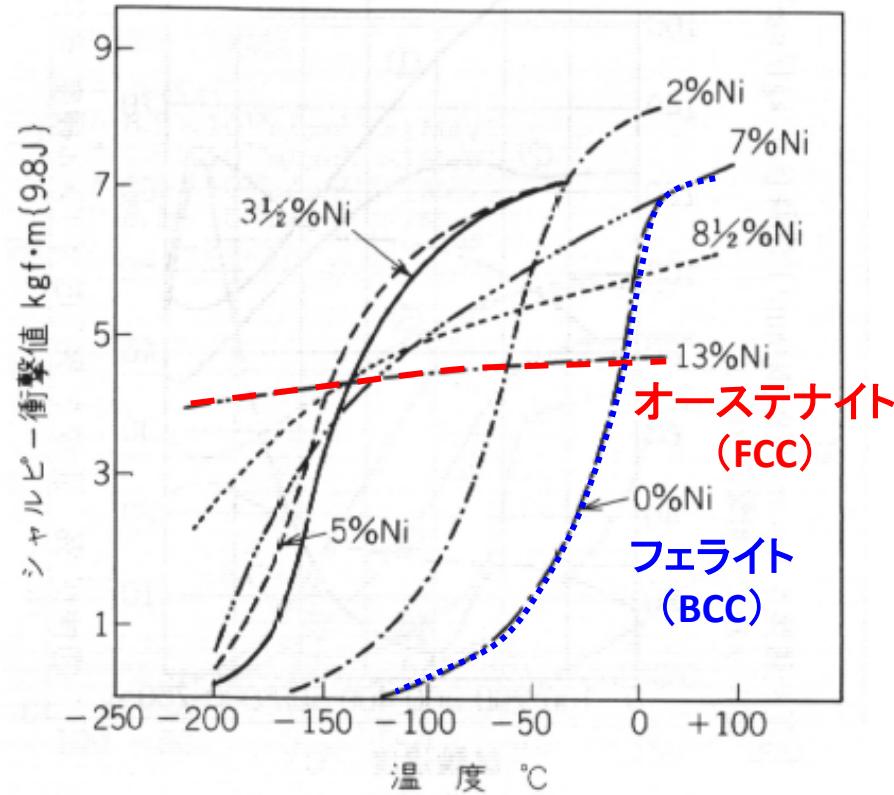


タイタニック号  
(1912年北大西洋で沈没)



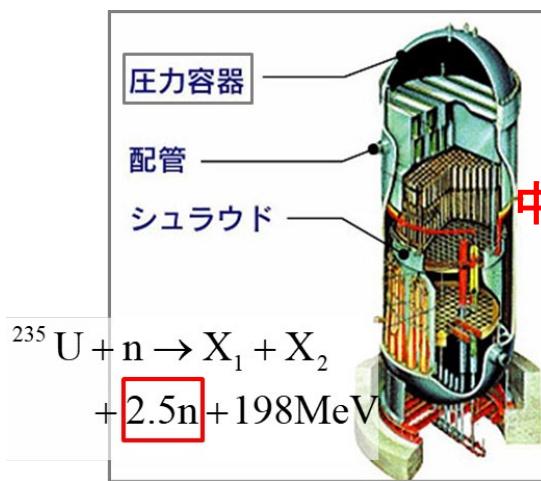
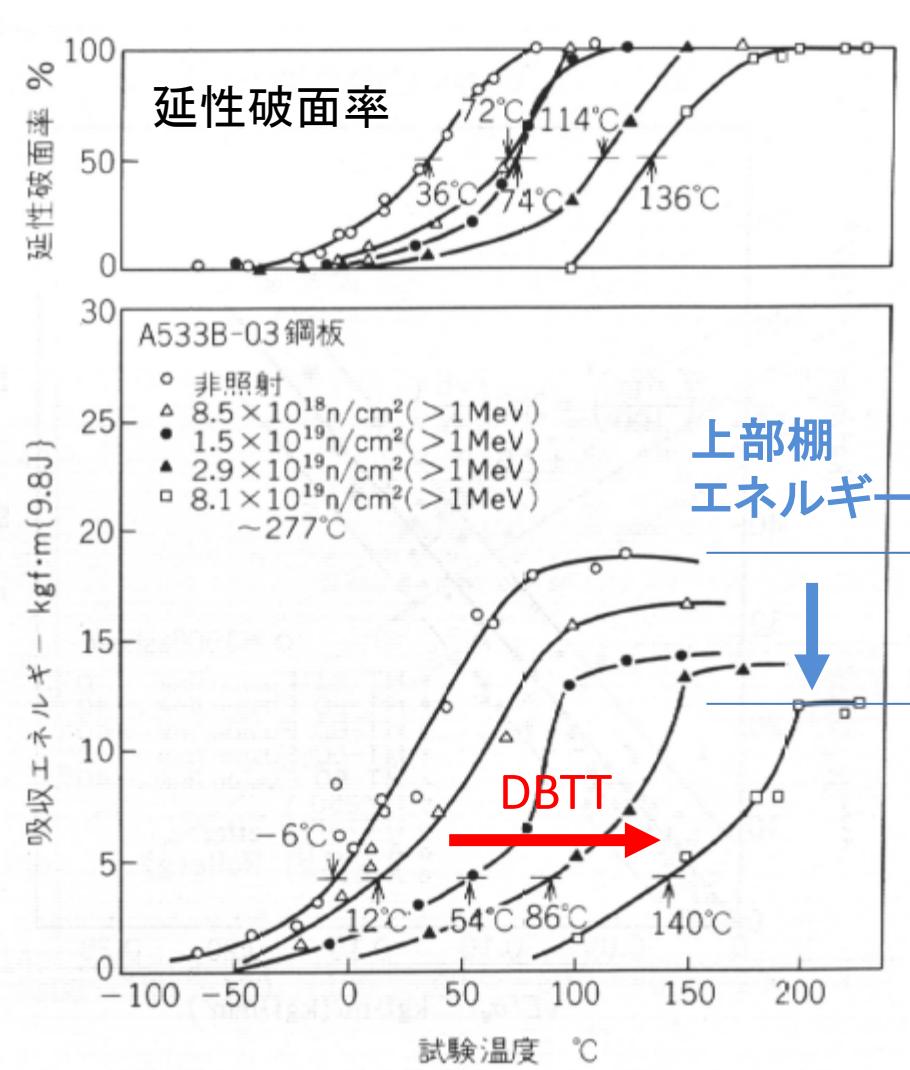
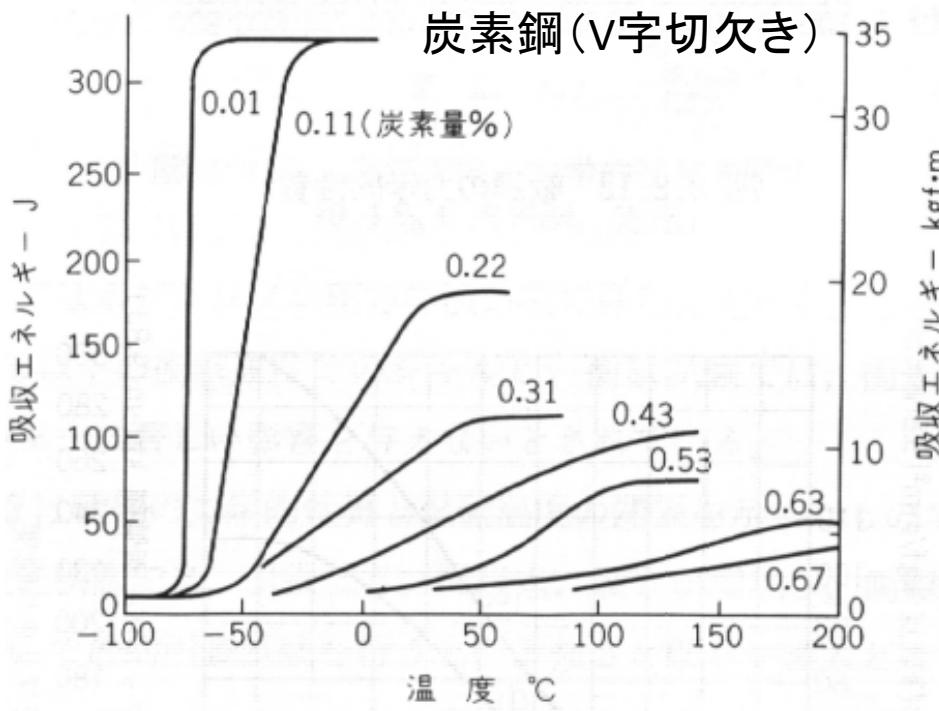


鉄の低温脆性に及ぼす  
各種元素の影響  
(Pのみ0.1%、他は1%)



鉄鋼のNi含有量と  
遷移温度の関係

FCCは低温脆性がない

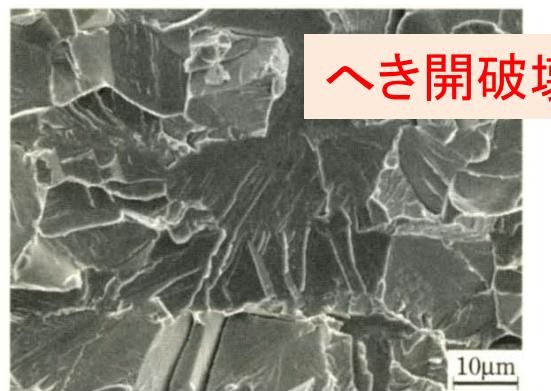
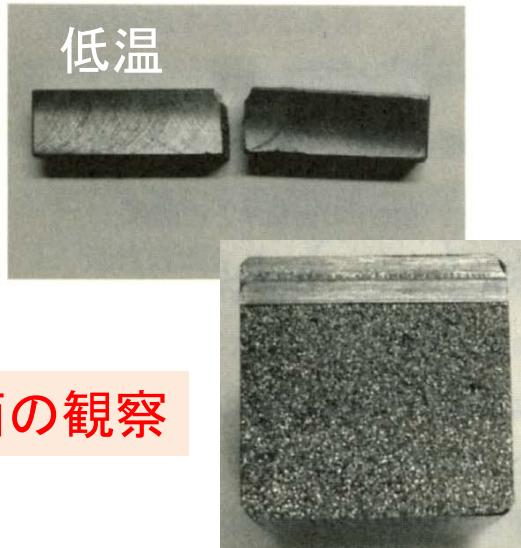


中性子照射した圧力容器鋼A533B鋼

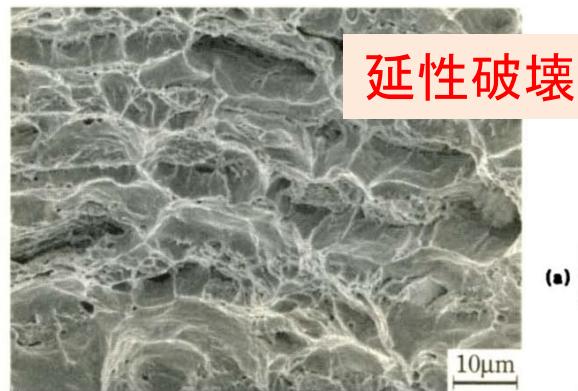
予め圧力容器の中に挿入しておいた試験片を定期的に取り出し、衝撃試験を実施

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

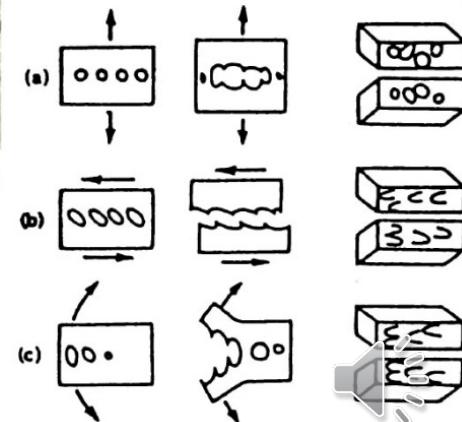
低炭素鋼の  
シャルピー  
試験



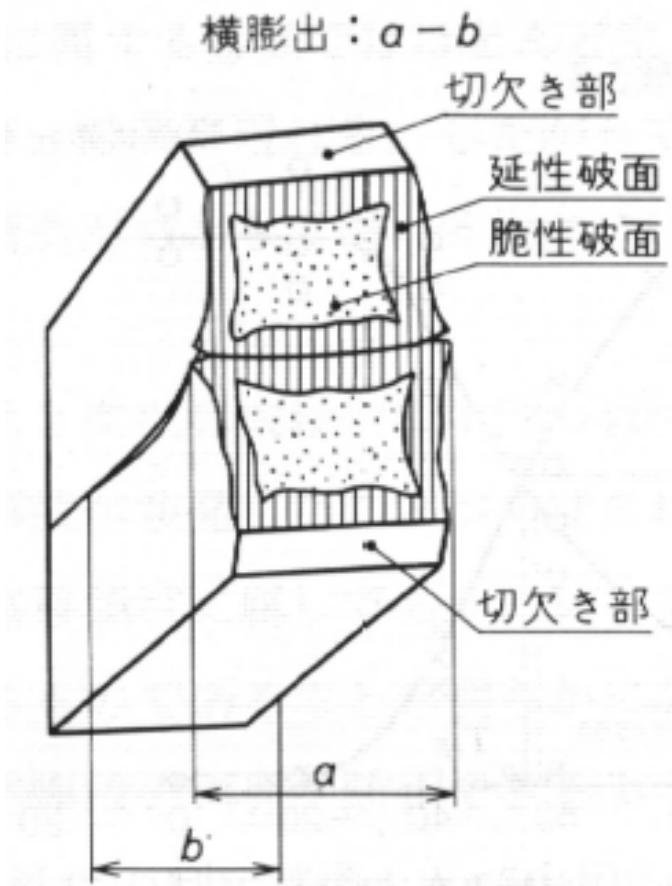
リバーパターン  
幾つかのへき開面が合流



くぼみ模様  
(ディンプル)

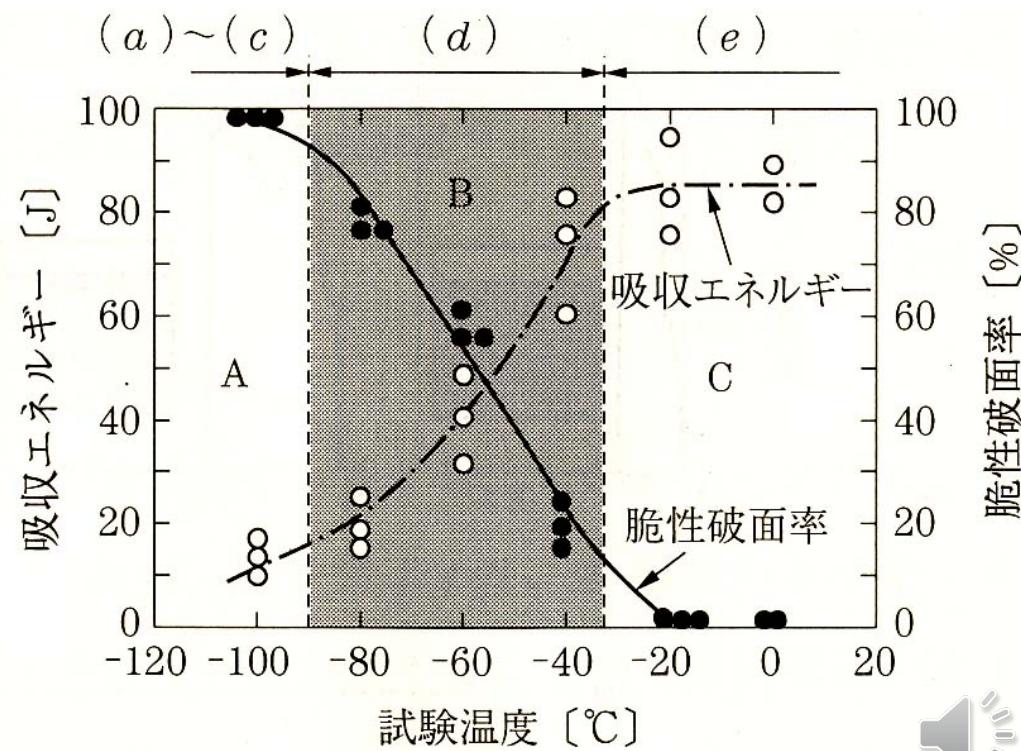


## ● 脆性破面率(衝撃試験)

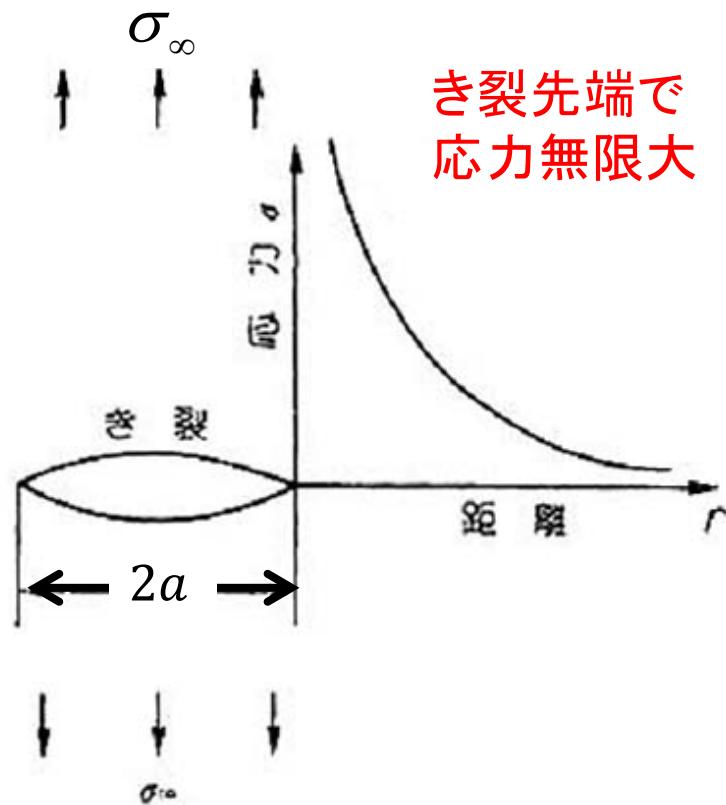


脆性破面率:  $C / A \times 100$

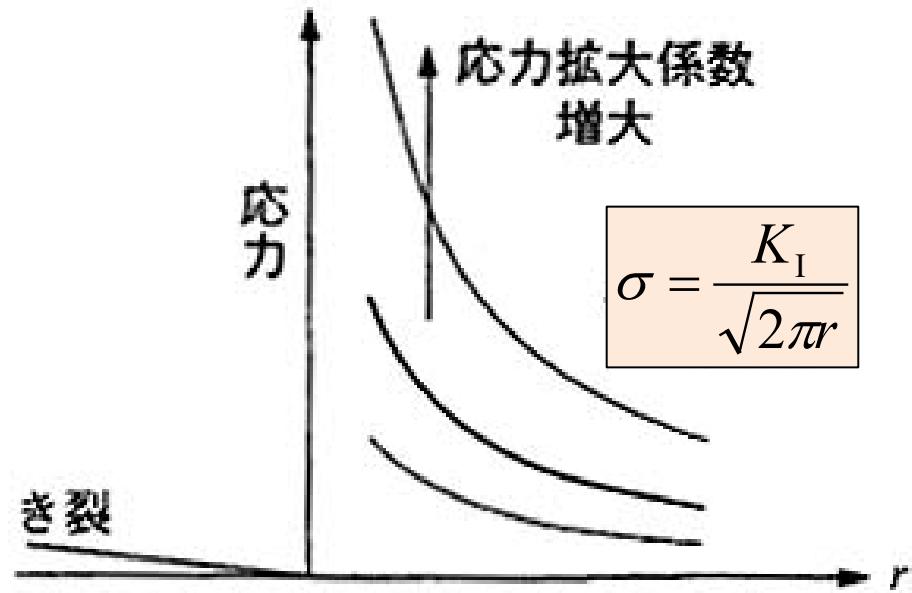
$C$ : 脆性破面面積  
 $A$ : 破面全面積



# ●破壊力学(き裂を扱う)



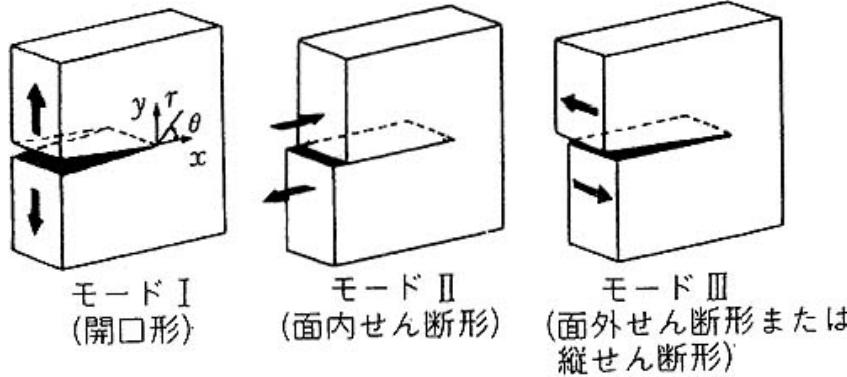
き裂先端で  
応力無限大



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

## 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



モードI  
(開口形)

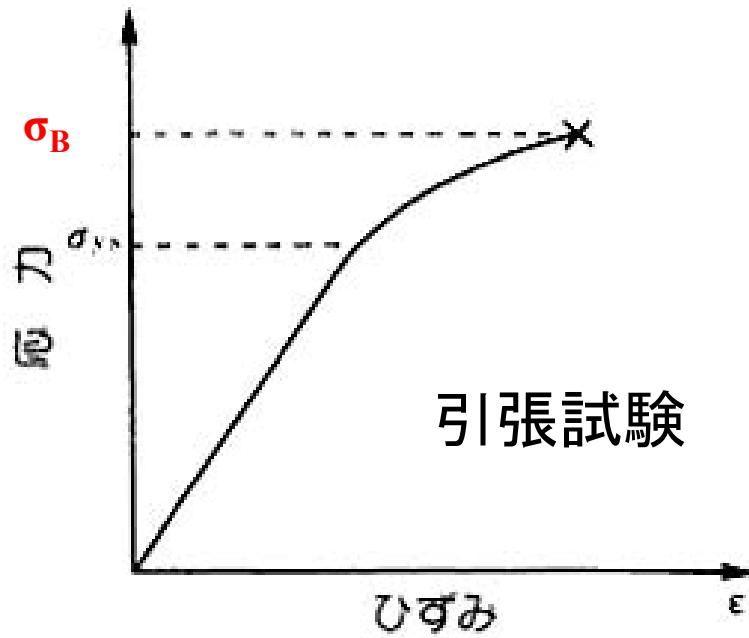
モードII  
(面内せん断形)

モードIII  
(面外せん断形または  
縦せん断形)

$K$ 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

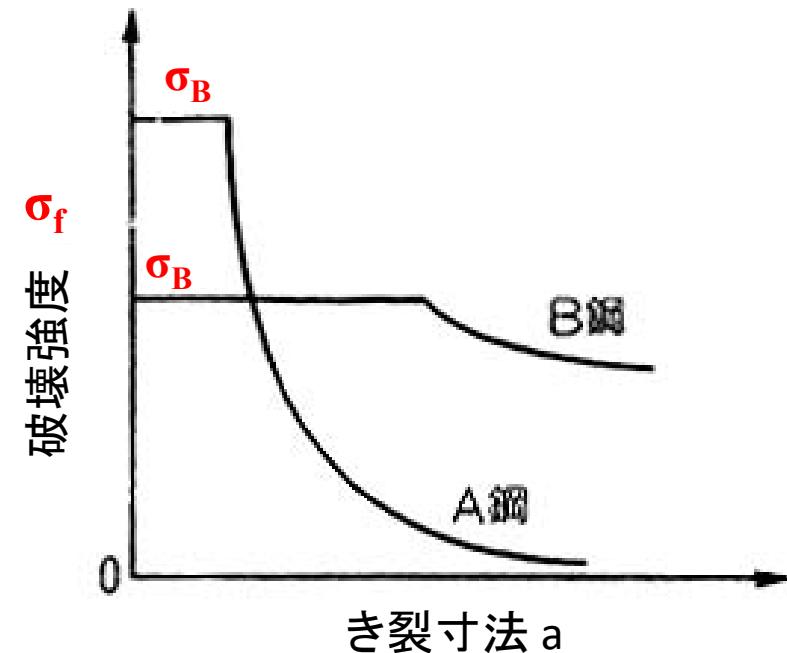
き裂がない



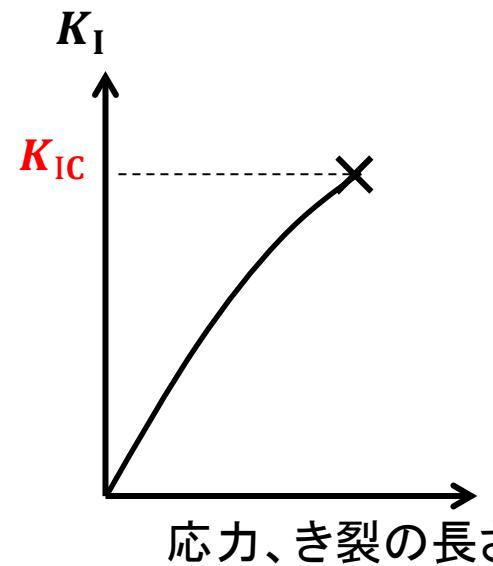
破壊の条件:  $\sigma \geq \sigma_B$

# 破壊力学

き裂を含む



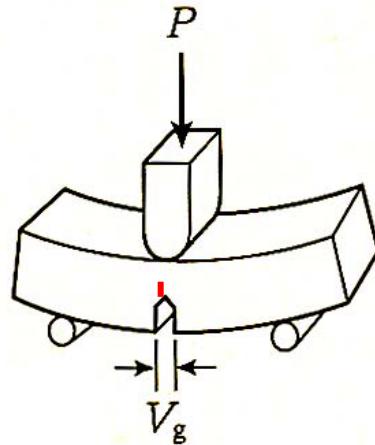
$$K_I \geq K_{IC}$$



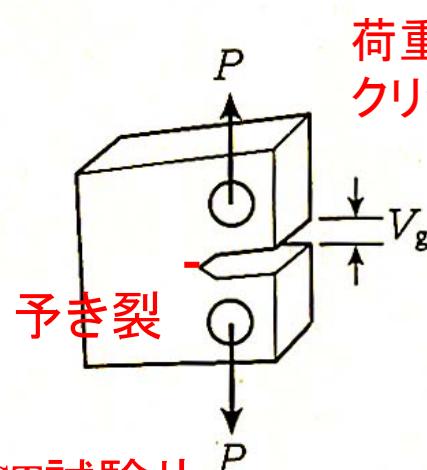
破壊靱性: 材料内に存在するき裂から新たに割れが進展する際の抵抗



## ●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

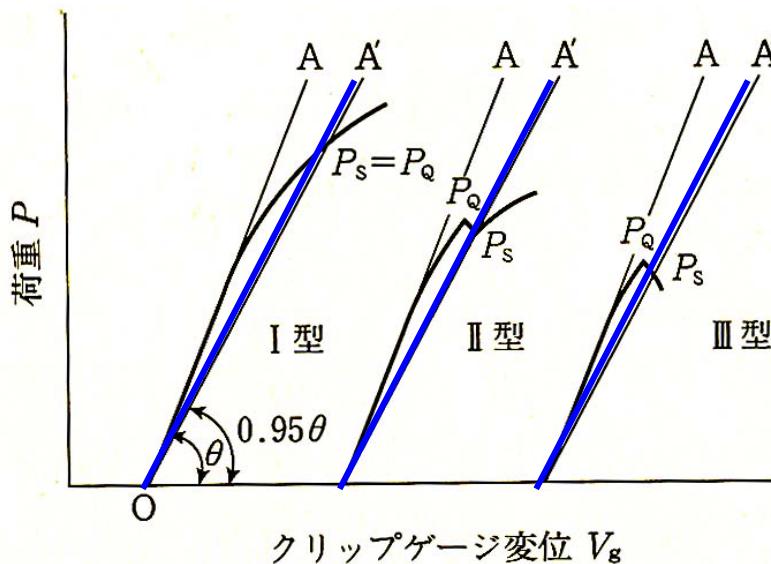
荷重 $P$ をかけ、  
クリップゲージで変位 $V_g$ を測定

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OPs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。

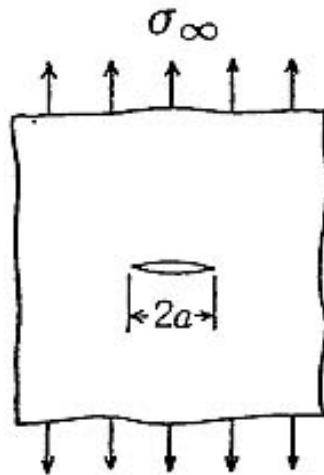


5%の勾配の減少  
(き裂長さが2%程度進展)

…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

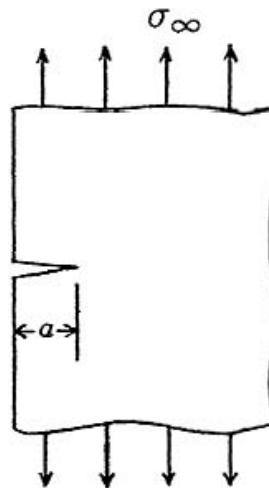


問 表面き裂が危険である点について、応力拡大係数の違いに基づき説明せよ。



$$\alpha = 1$$

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



$$\alpha = 1.1215$$

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

$$\begin{aligned} & [a \rightarrow 2a] \\ & K_I = 1.1215 \sigma_\infty \sqrt{2\pi a} \\ & = 1.586 \sigma_\infty \sqrt{\pi a} \end{aligned}$$

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)

$$\begin{aligned} K &= \sigma \sqrt{\pi a} \\ &\geq K_{IC} \end{aligned}$$



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

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

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

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

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

各種材料の破壊靱性値

材料	$K_{IC}$ (MPa·Vm)
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
鉄鉄	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・破壊靭性試験**

●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、破壊靭性値

●平面ひずみ破壊靭性試験

**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

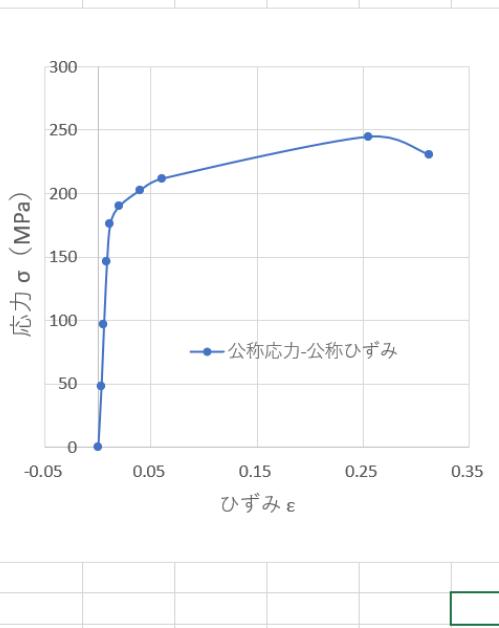
金属の強度と破壊 黒木・大森・友田 森北出版

ミクロの傷を追う 岸・志波 丸善

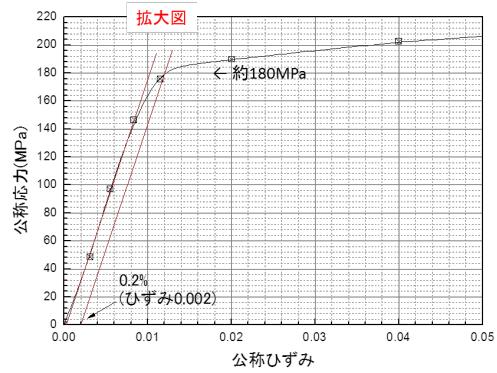


## 6/11の課題の解答例

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	変位 $\Delta l$ (mm)	荷重 P (kN)	公称応力 (MPa)	公称ひずみ							
2	0	0.0	0	0.00							
3	0.25	3.8	48	0.00							
4	0.44	7.6	97	0.01							
5	0.67	11.5	146	0.01							
6	0.92	13.8	176	0.01							
7	1.6	14.9	190	0.02							
8	3.2	15.9	202	0.04							
9	4.8	16.6	211	0.06							
10	20.4	19.2	244	0.26							
11	25	18.1	230	0.31							
12											
13		試験前	試験後								
14	試験片直 径(mm)	10	7								
15	標点距離 (mm)	80	100								
16											



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:  $(100-80)/100 * 100 = 25\%$   
絞り:  $(5^2\pi - 3.5^2\pi) / 5^2\pi * 100 = 51\%$



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	焼き戻し温度 (K)	ピッカース 対角線長さ (mm)	ピッカース 硬さ HV						
2	293	0.290	661						
3	373	0.304	602						
4	473	0.315	561						
5	573	0.327	520						
6	673	0.357	437						
7	773	0.373	400						
8									
9		(N)	(kgf)						
10	荷重	294	30						
11									

