

# 材料強度設計No.8

知能機械システム工学科

坂本東男

Sakamoto.haruo@kochi-tech.ac.jp

教員室A429、TEL:0887-57-2317

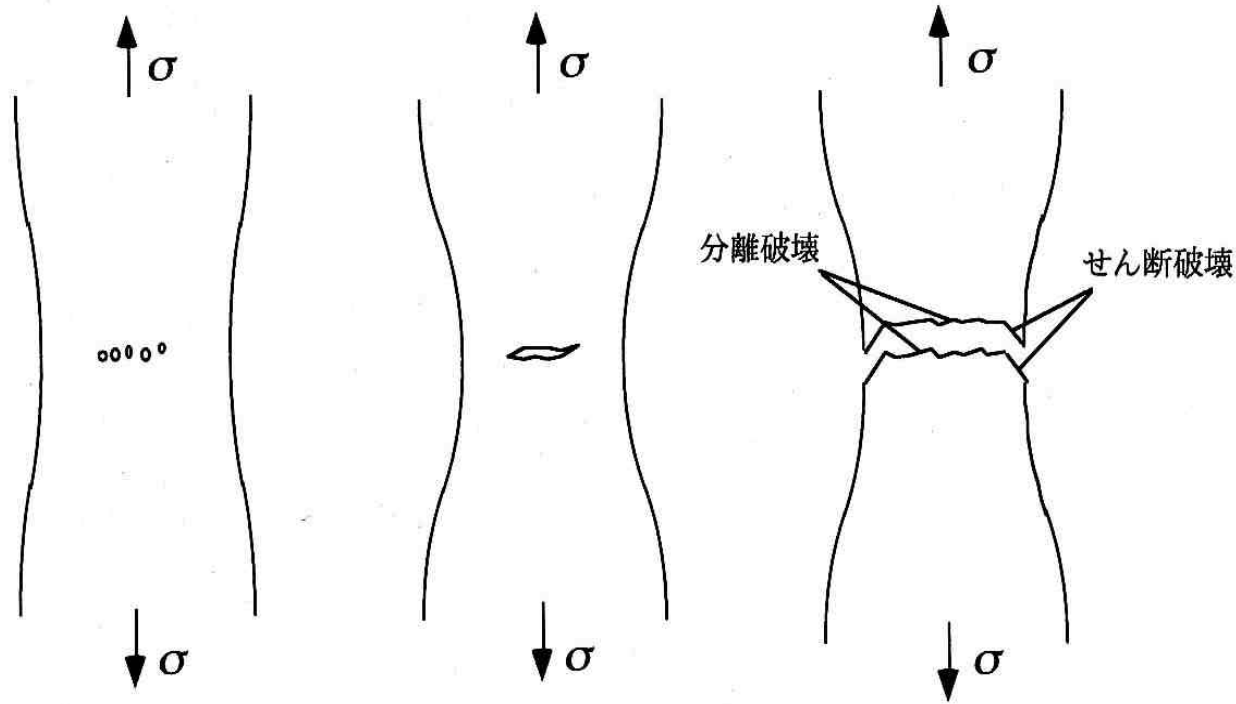
研究室A213、TEL:57-2243

# No.8の講義内容 (金属の破壊と対策)

テキストP166-186

- 1 .延性破壊
- 2 .脆性破壊
- 3 .疲労破壊
- 4 .クリープ破壊
- 5 .環境破壊
- 6 .機械構造物の強度設計の基礎  
(応力集中と応力拡大係数)
- 7 .破壊力学
- 8 .フラクトグラフィ

# 延性破壊



(a) 空洞の発生

(b) 空洞の合体・成長

(c) 最終破断 (せん断破壊)

図 9.2 カップアンドコーン破壊の過程

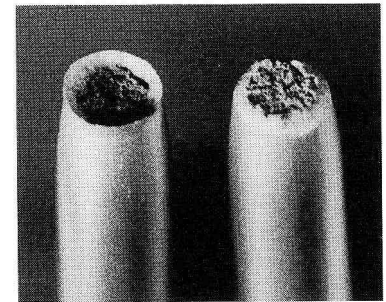


図 9.1 カップアンドコーン破壊  
(S35C 焼なまし材)

# 延性破壊と遅れ破壊の波面

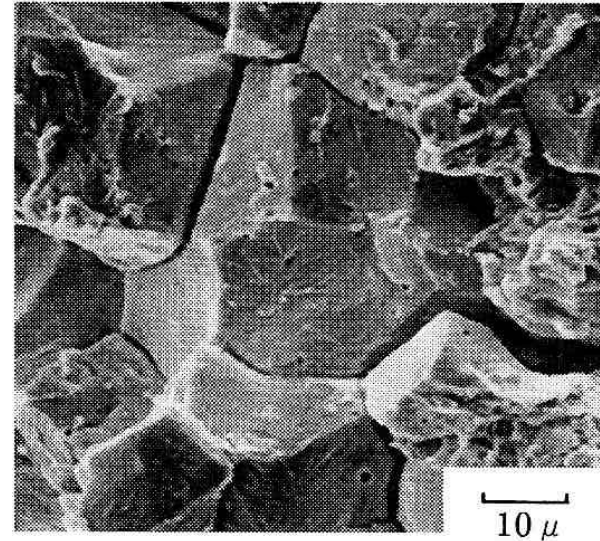
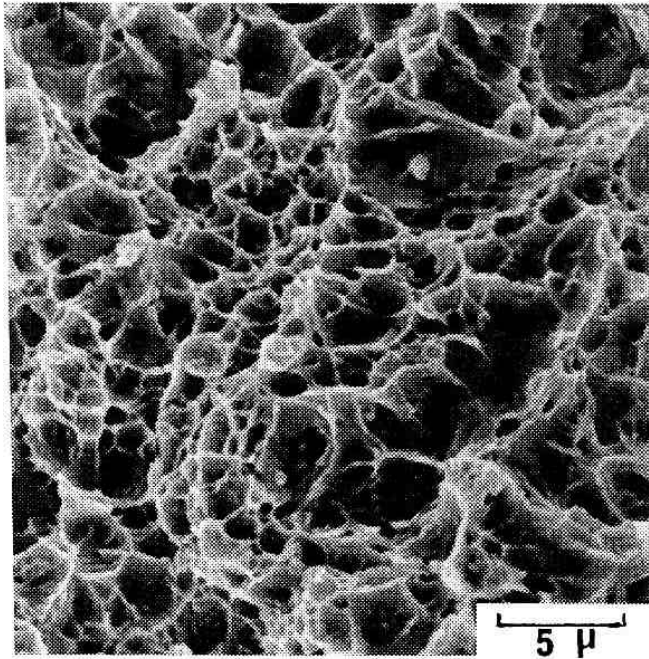


図 9.3 延性破壊と遅れ破壊の破面

- (a) 延性破壊にみられるディンプル破面 (高張力鋼板 HT 80)
- (b) 遅れ破壊にみられる粒界破面 (FIIT ボルト)

# 脆性破壊（へき開破壊-粒内）

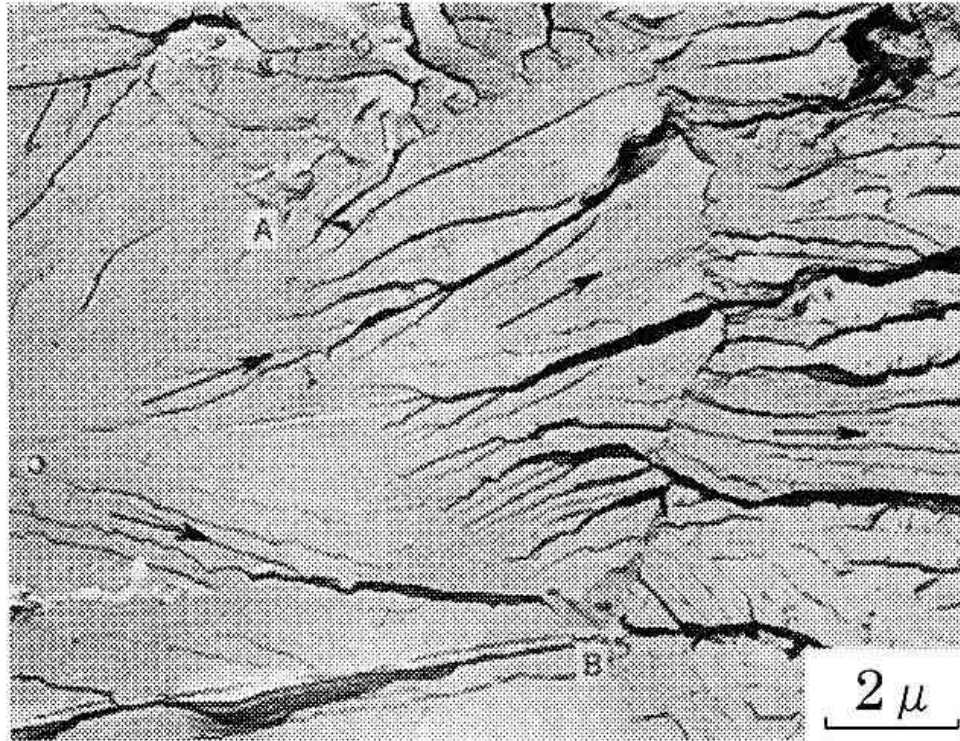


図 9.4 へき開破壊の破面（炭素鋼の衝撃破壊，レプリカ写真）  
（破壊力学と材料強度講座 5：フラクトグラフィ，1980，培風館）

# 疲労破壊 (ビーチマーク)

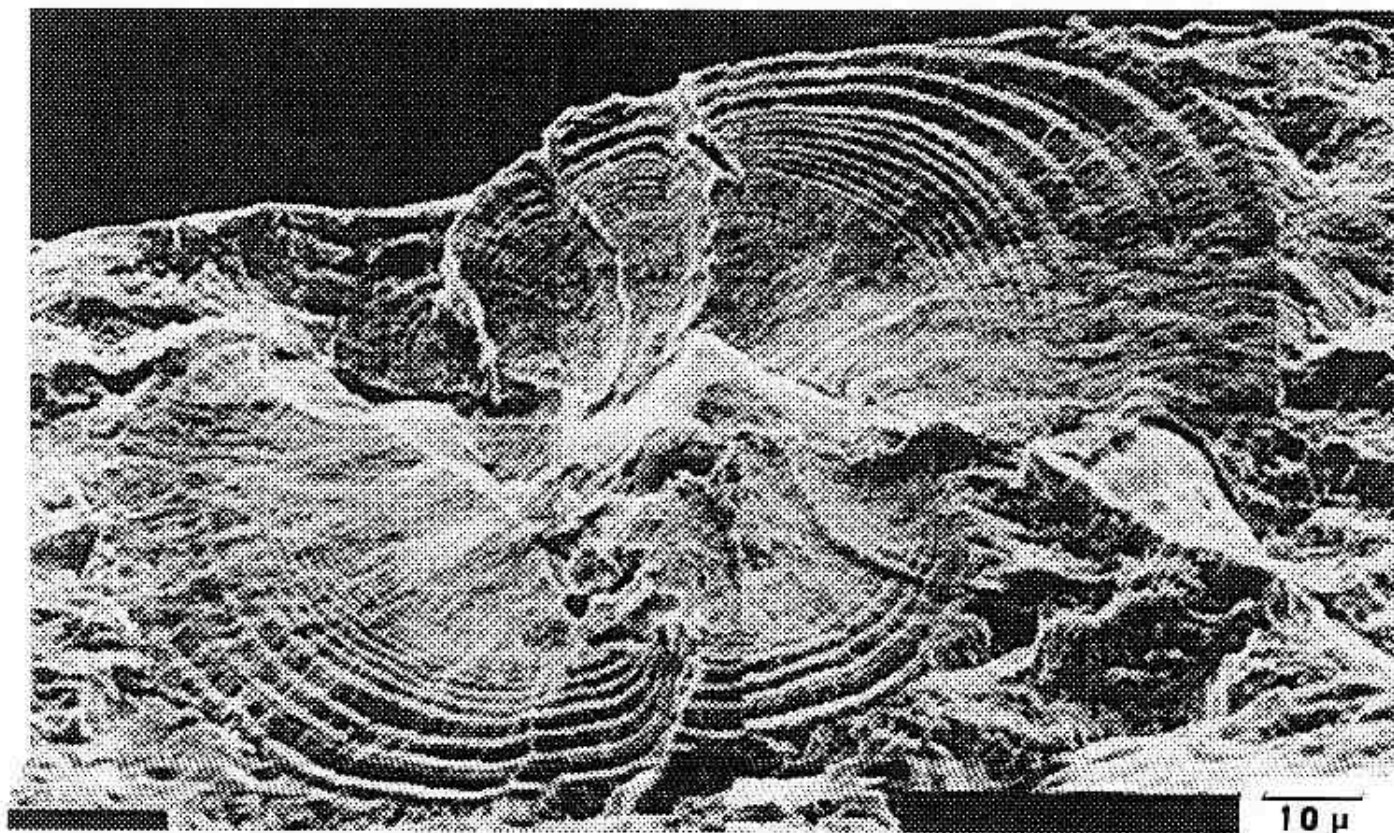


図 9.5 疲労破面にみられる貝殻模様 (鉄道車両用車軸)

# 疲労試験結果(S-N曲線)

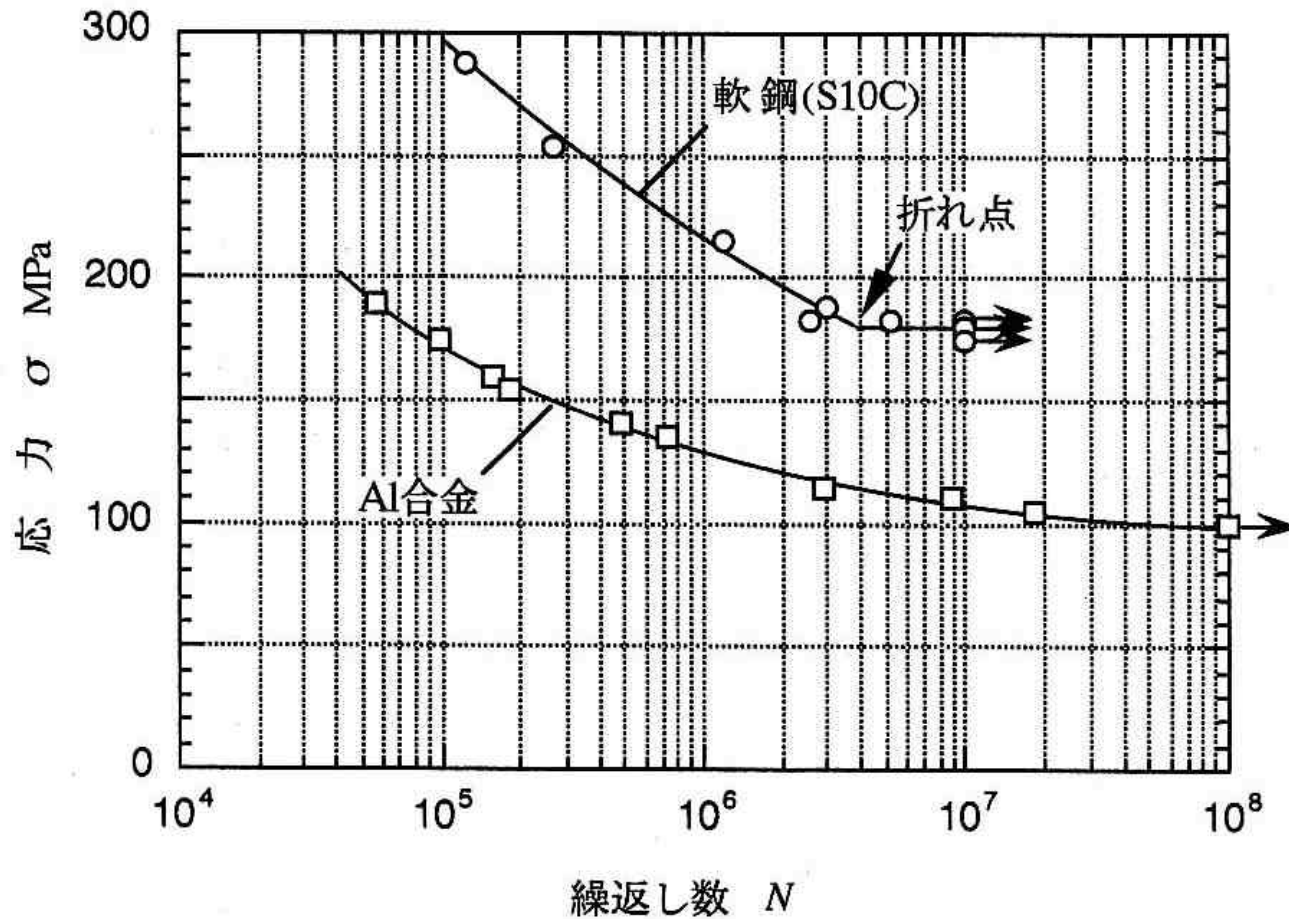


図 9.7 S-N 曲線

# クリープ (一定荷重下で変形する) 曲線

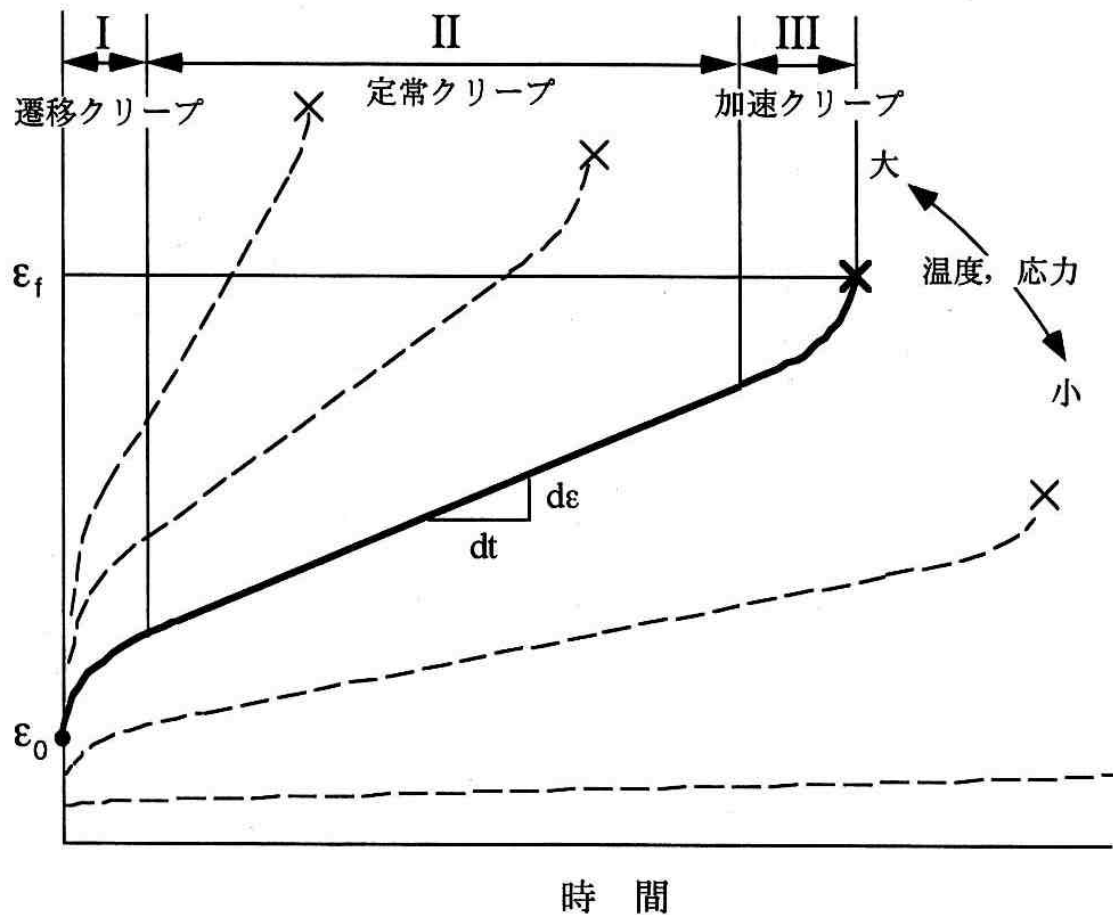


図 9.8 クリープ曲線



# 環境破壊の例 (応力腐食割れ)

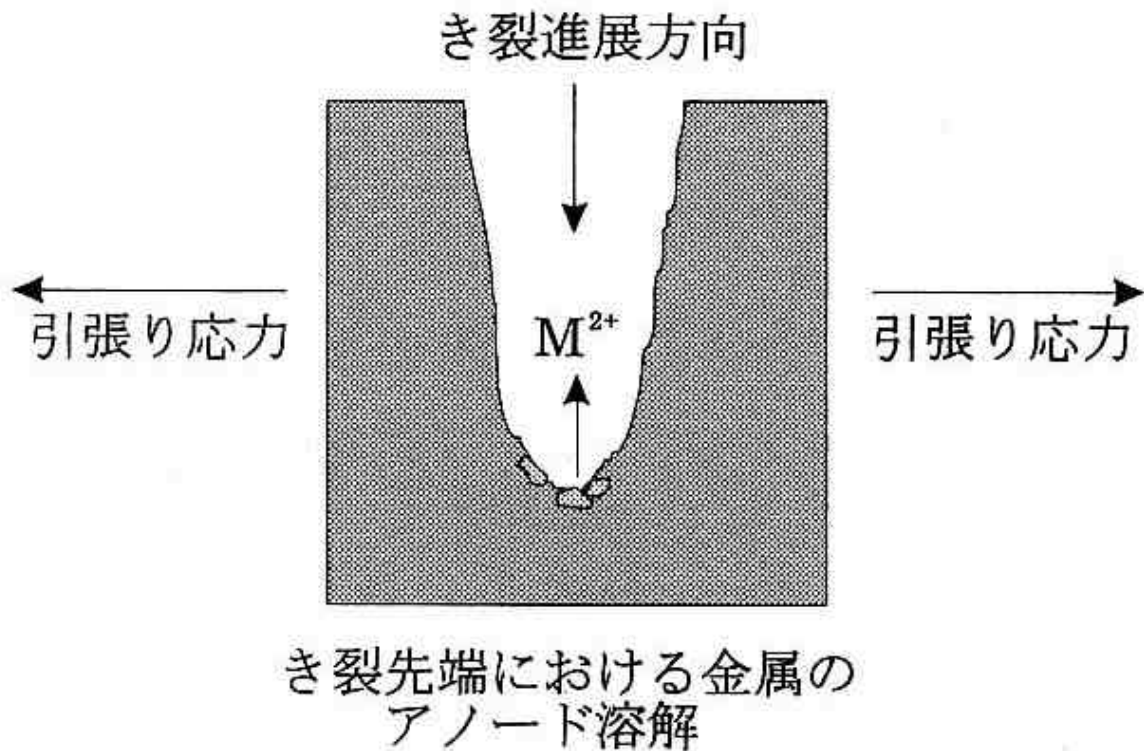


図 9.9 応力腐食割れの機構

# 環境破壊の例 (腐食疲労)

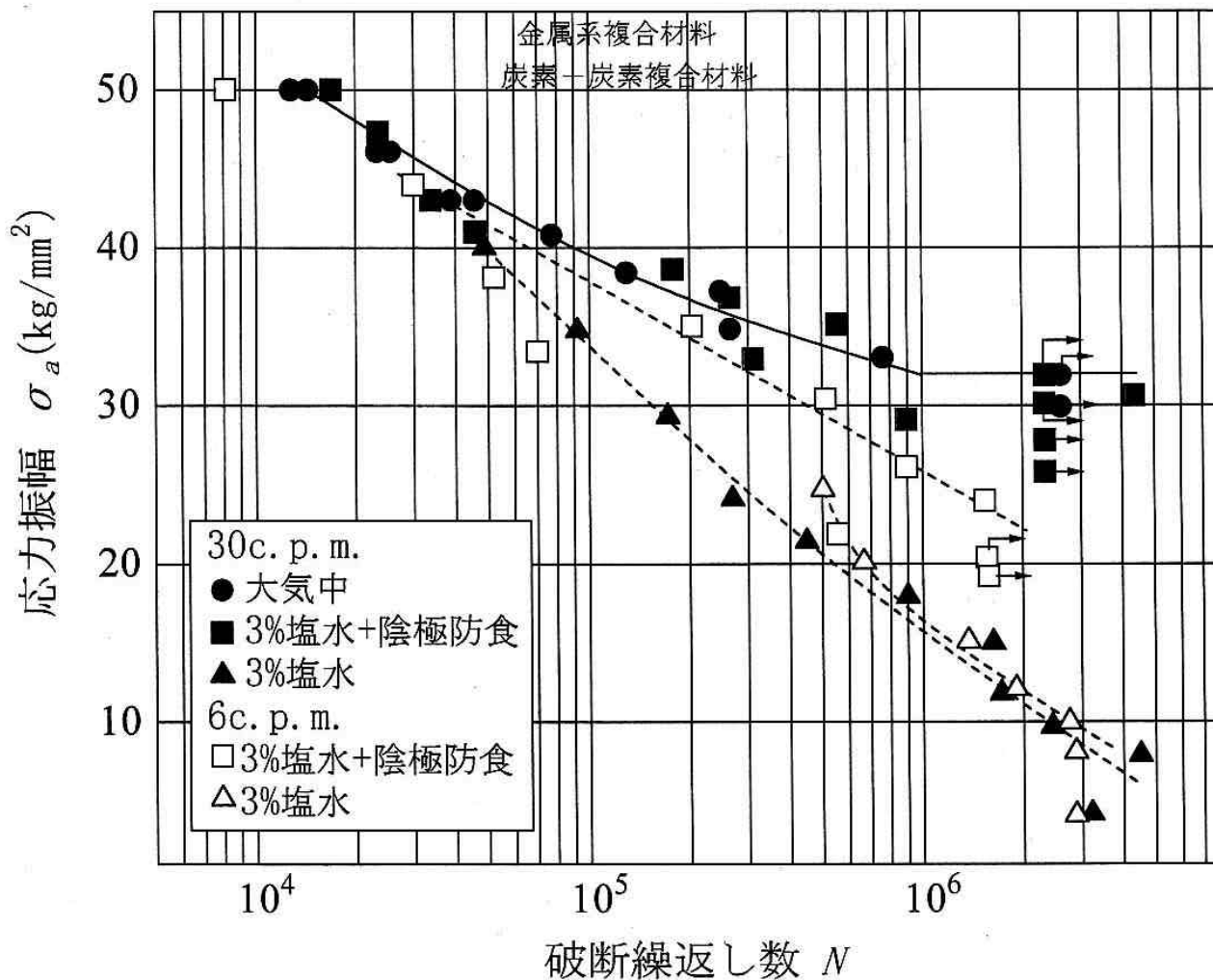


図 9.10 腐食疲労の S-N 曲線の例

# 応力集中

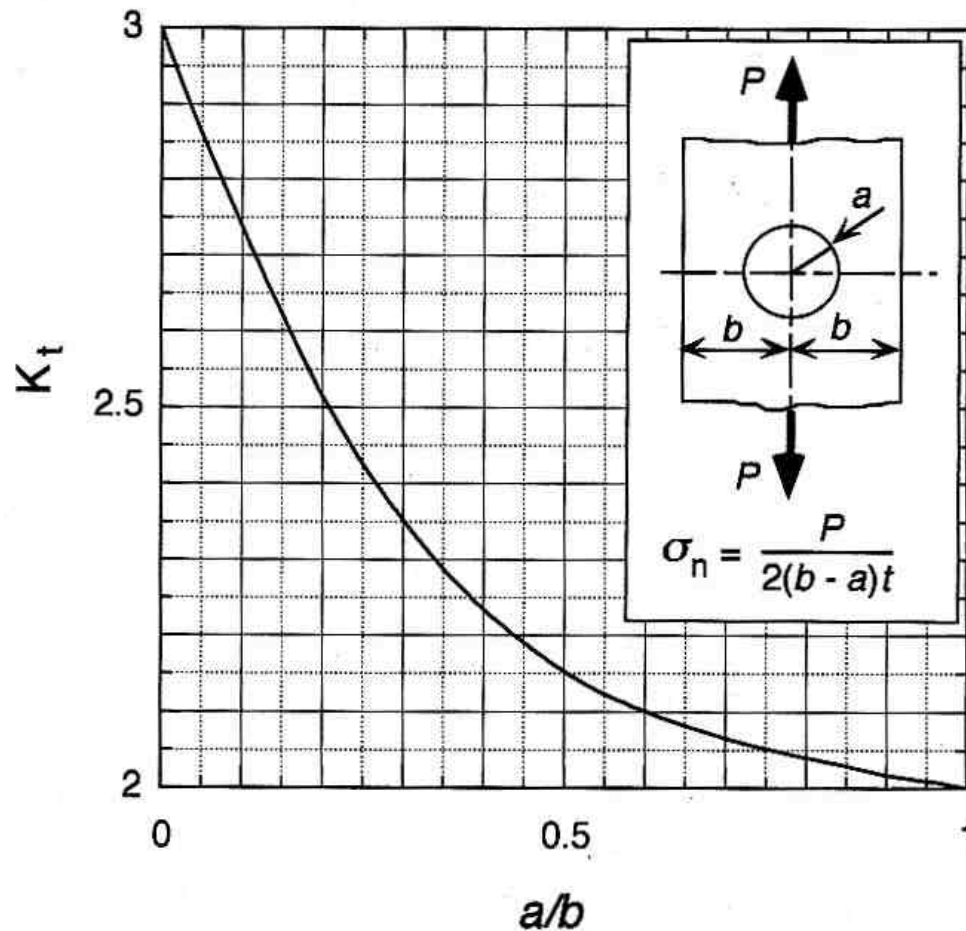


図 9.11 応力集中係数,  $K_t$  (引張り)

# 材料力学と破壊力学

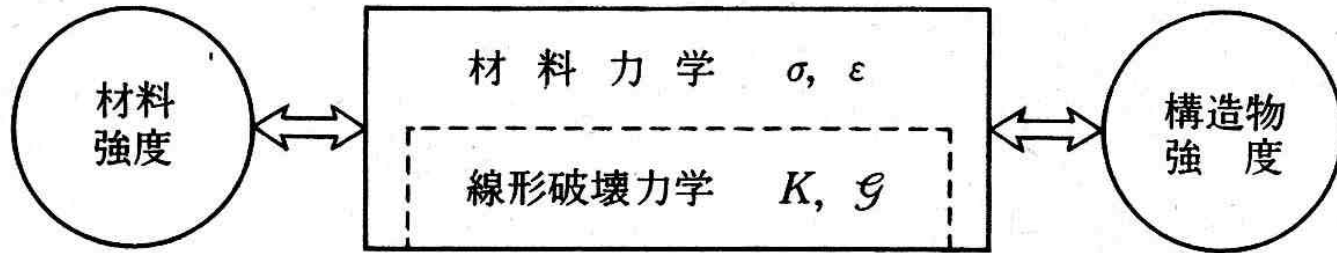


図 1.2 「材料力学」と線形破壊力学

- 狭義の材料力学はき裂のない材料の力学
- 破壊力学はき裂のある材料の力学
- 広義には材料力学は上記の 2つを含む。

# 材料力学 (応力 $\sigma$ あるいはひずみ $\varepsilon$ )と 破壊力学 (応力拡大係数 $K$ あるいはエネルギー変化率 $G$ )の 力学パラメーター

表 1.1 「材料力学」と線形破壊力学に  
おける力学的環境のパラメーター

	対象とする現象の例	力学的環境のパラメーター	現象の起きる条件式	材料強度のパラメーター
「材料力学」	降伏	$\sigma$ または $\varepsilon$	$\sigma = \sigma_{ys}$	降伏点 $\sigma_{ys}$
	最大負荷容量		$\sigma = \sigma_B$	引張強さ $\sigma_B$
	疲労寿命 $N_c$		$N_c = f(\Delta\sigma)$	(SN 曲線)
	クリープ破断時間 $t_c$		$t_c = f(\sigma_0)$	(クリープ破断曲線)
線形破壊力学	ぜい性破壊	$K$ または $G$	$K = K_c$ , または $G = G_c$	破壊靱性 $K_c$ または $G_c$
	疲労によるクラック進展速度		$\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$	クラック進展速度
	上記進展の下限界		$\Delta K \leq \Delta K_{th}$ で $\frac{da}{dN} \approx 0$	$\Delta K_{th}$
	腐食環境下でのクラック進展速度		$\frac{da}{dt} = f(K_0)$	(クラック進展曲線)
	上記進展の下限界		$K \leq K_{Isc}$ で $\frac{da}{dt} \approx 0$	$K_{Isc}$

# 破壊力学的アプローチ

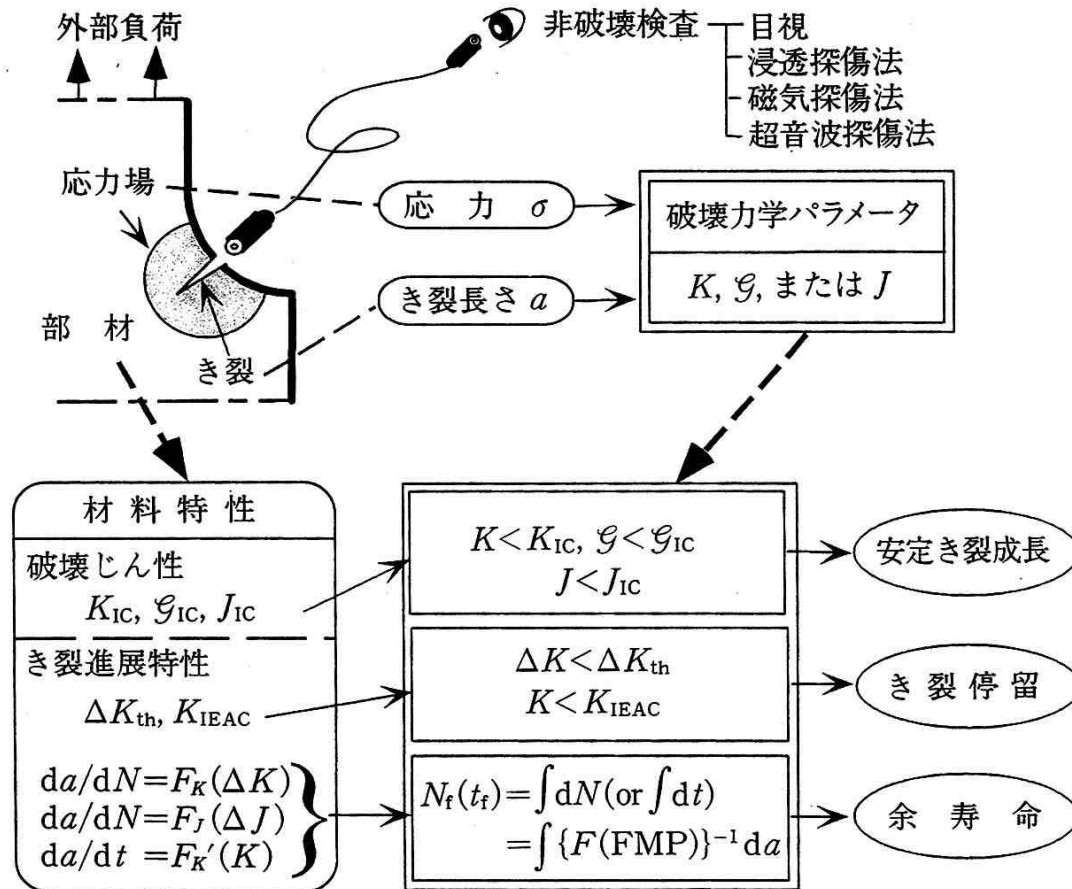


図 5.1 健全性評価ための破壊力学的アプローチ。

\*) FMP (Fracture mechanics parameter: 破壊力学パラメータ)

# 応力拡大係数(1)

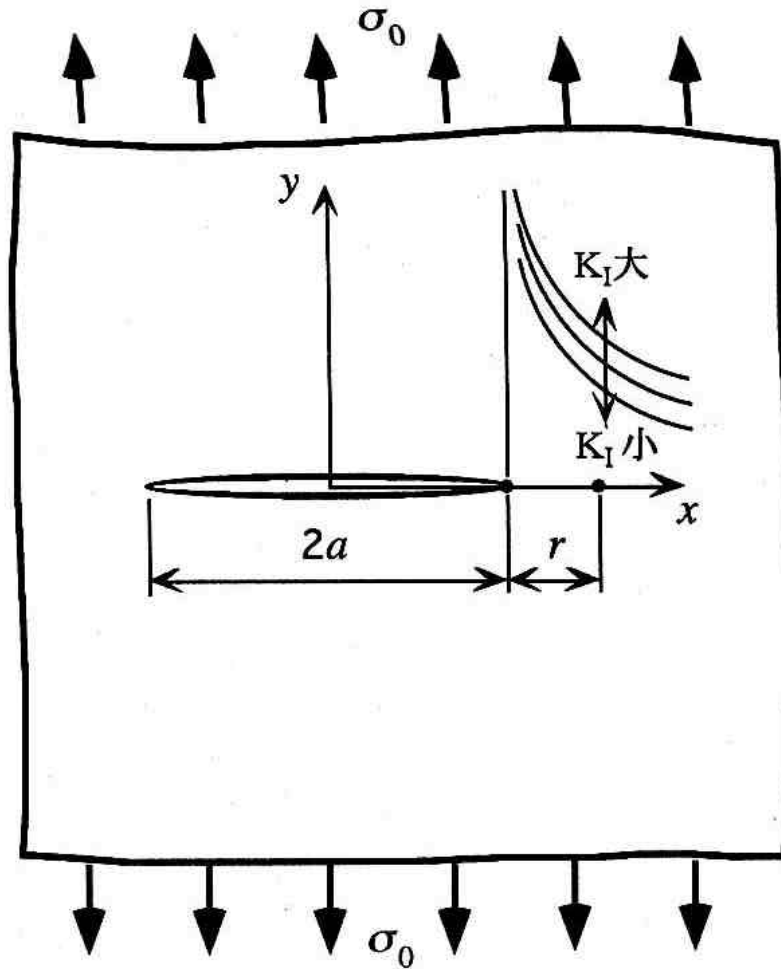
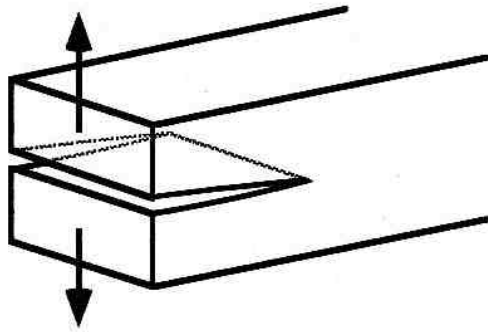
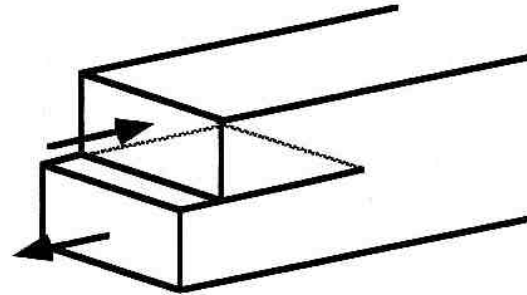


図 9.12 長さ  $2a$  の二次元き裂をもつ無限板の一様引張り

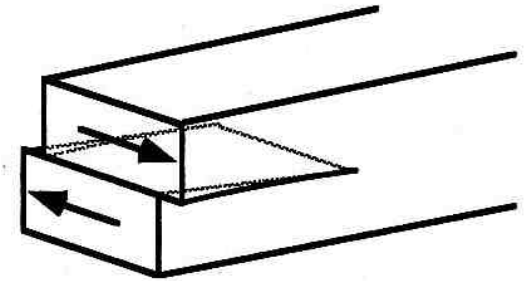
# 変形様式



(a) モード I  
(開口型)



(b) モード II  
(面内せん断型)

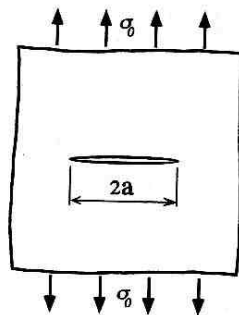


(c) モード III  
(面外せん断型)

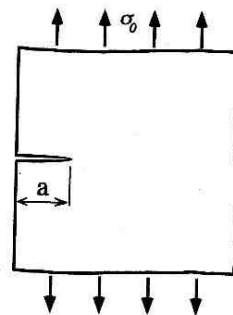
図 9.13 き裂先端近傍の 3 つの独立な変形様式



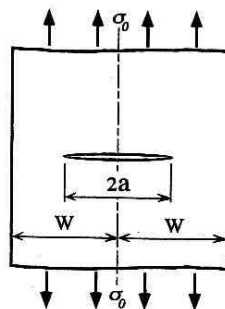
# 応力拡大係数(2)



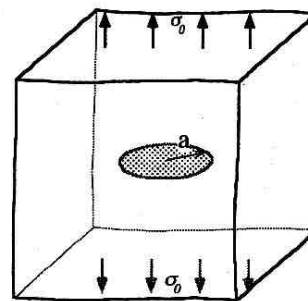
(a) 無限板のき裂  
 $K_I = \sigma_0 \sqrt{\pi a}$



(b) 半無限板の縁き裂  
 $K_I = 1.12 \sigma_0 \sqrt{\pi a}$



(c) 帯板の中央き裂  
 $K_I = F(\lambda) \sigma_0 \sqrt{\pi a}$   
 $F(\lambda) = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^4) \sqrt{\sec(\pi\lambda/2)}$   
 $\lambda = a/w$



(d) 無限体の円盤状き裂  
 $K_I = (2/\pi) \sigma_0 \sqrt{\pi a}$

図 9.14 応力拡大係数の例 (モード I)

# 応力拡大係数(3)

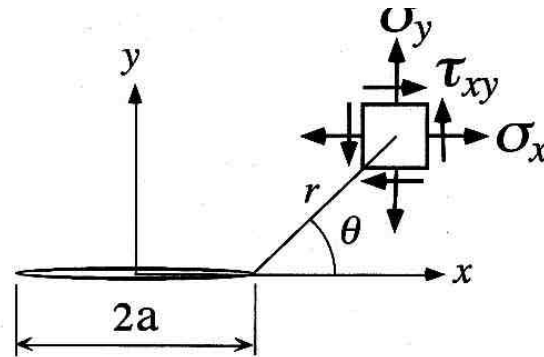


図 9.15 き裂先端近傍の応力の定義

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \end{aligned} \right\}$$

# 応力拡大係数と破壊靱性値

【例題 9.5】 使用応力を降伏応力の 1/3 とした場合, 表 9.1 の材料で, 脆性破壊を起こさないき裂の寸法  $2a$  の最大値  $2a_c$  を求めよ. ただし, き裂 (長さ  $2a$ ) は, 広い板の中央に引張荷重方向に垂直に存在し, 遠方から一様な応力を受ける. また, 小規模降伏の条件は満足されるとする.

表 9.1

材料	降伏応力 $\sigma_Y$ kgf/mm <sup>2</sup>	破壊じん性 $K_c$ kgf · m <sup>-3/2</sup>
軟鋼	30	750
マルエージング鋼	170	300
高力Al合金	54	96

【解】 図 9.14(a) の式と (9.15) 式から,

$$K_I = \frac{\sigma_Y}{3} \sqrt{\pi a} > K_c \quad (9.16)$$

$$2a_c = \frac{18}{\pi} \left[ \frac{K_c}{\sigma_Y} \right]^2 \quad (9.17)$$

表 9.2

材料	最大き裂寸法 $2a_c$ mm
軟鋼	3580
マルエージング鋼	17.8
高力Al合金	18.1

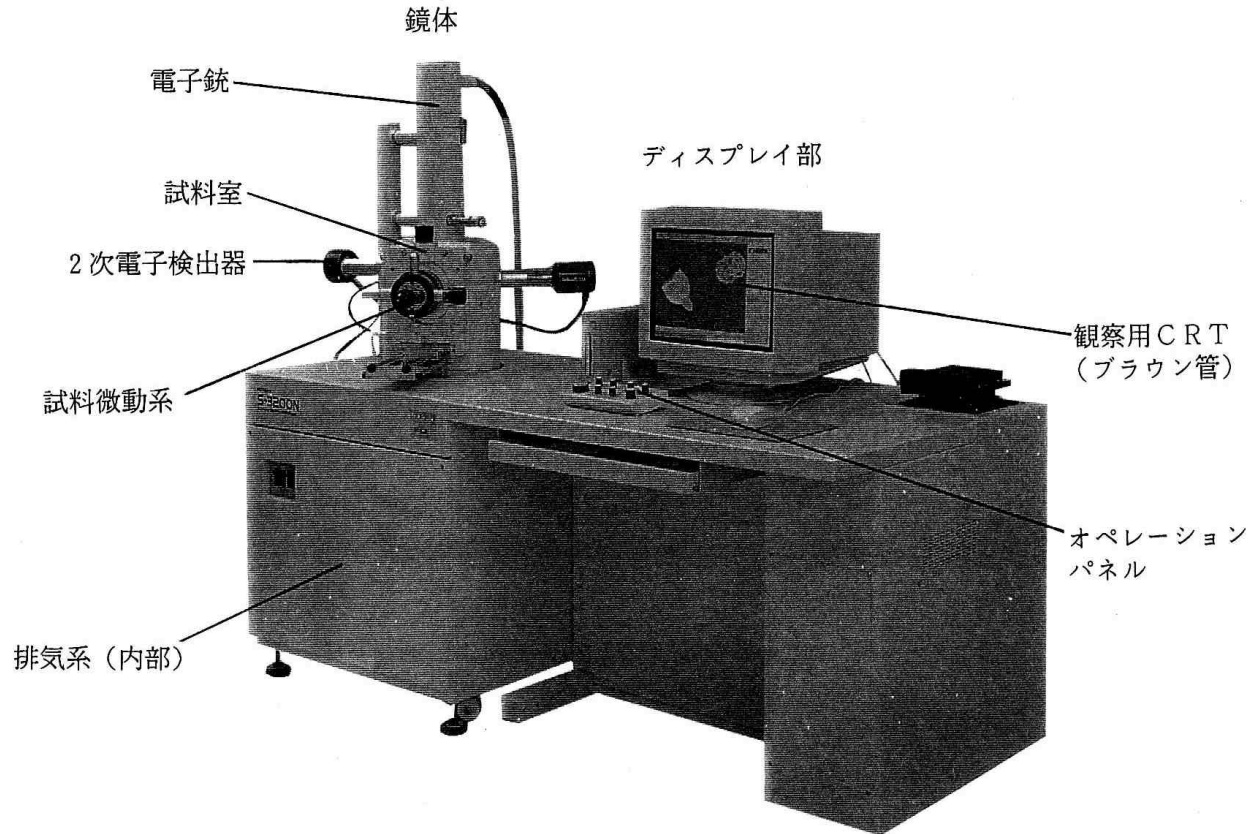
# 応力拡大係数範囲とき裂進展

〔例題 9.6〕 き裂伝播速度が (9.18) 式で、応力拡大係数の変動幅が  $\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}$  で与えられるとき、き裂寸法が  $a_i$  から  $a$  に成長するまでに要する繰返し数  $N$  を求めよ。ただし、 $\Delta\sigma = \text{一定}$ 、 $n > 2$  とする。

$$\begin{aligned} \text{〔解〕 } N &= \int_0^N dN = \int_{a_i}^a \frac{da}{C(\Delta K)^n} = \frac{1}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi})^n} \int_{a_i}^a \frac{da}{a^{n/2}} \\ &= \frac{1}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi})^n (n/2 - 1)} \left[ \frac{1}{a_i^{n/2-1}} - \frac{1}{a^{n/2-1}} \right] \end{aligned} \quad (9.19)$$

# フラクトグラフィー (SEM- Scanning Electron Microscope)

SEMの外観と構成  
(日立S-3200N形)



# 各種顕微鏡 (光学顕微鏡、TEM-Transmission Electron Microscope、SEM)

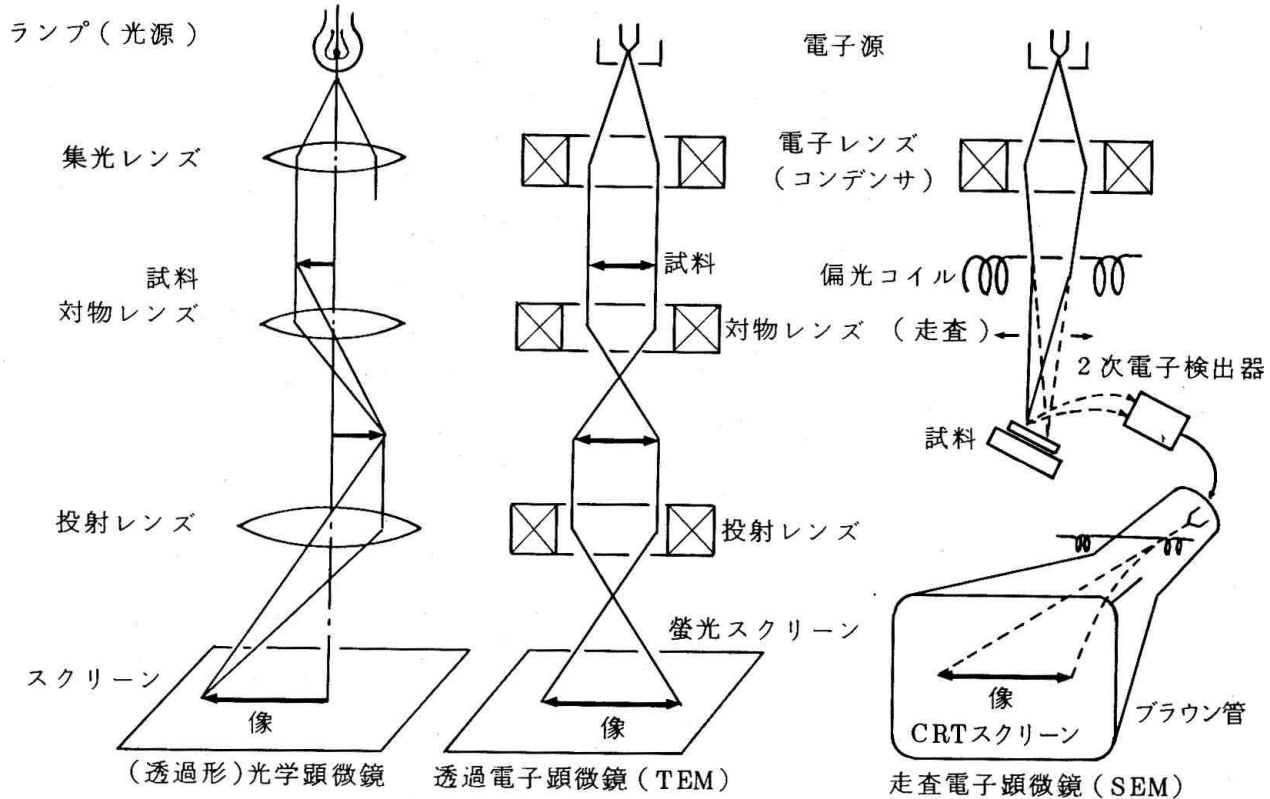


図1-3 各種顕微鏡

# SEMの詳細 (2次電子の像)

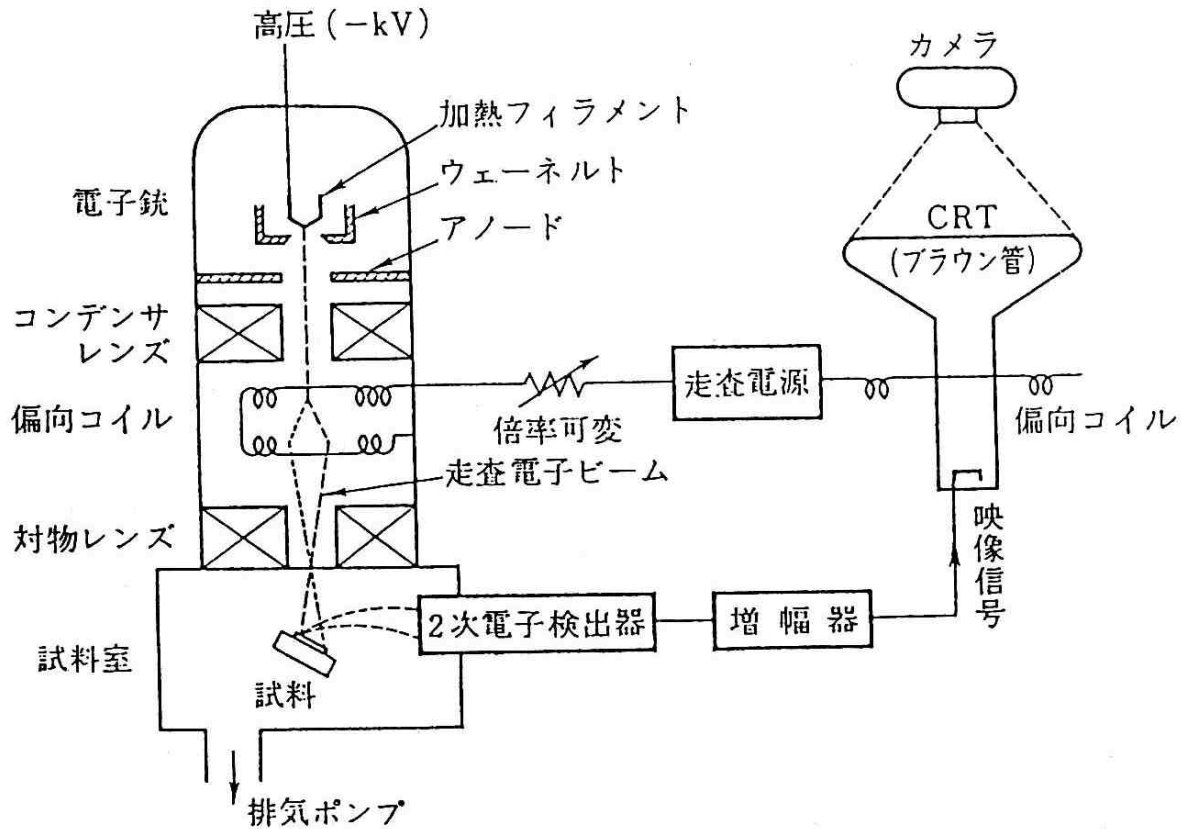


図1-2A SEMの原理

# X線も利用して元素分析も可能

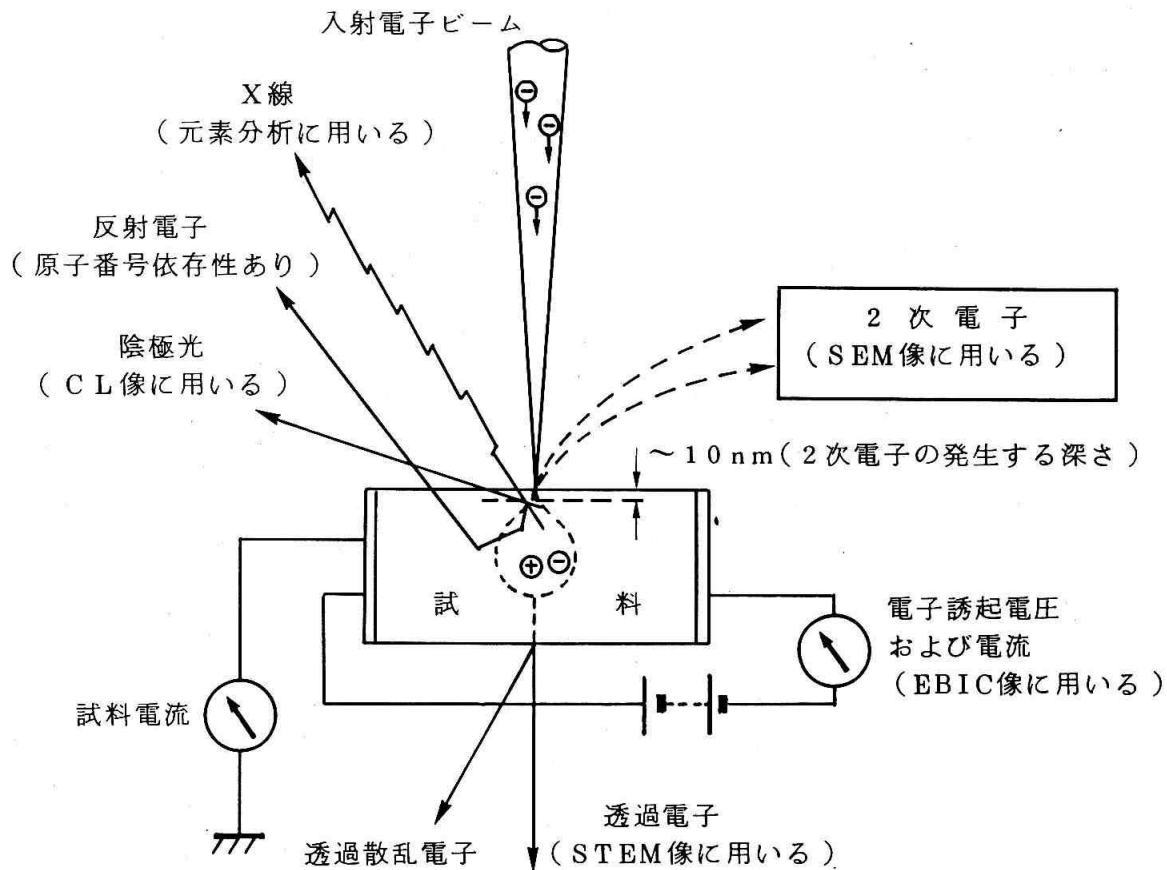
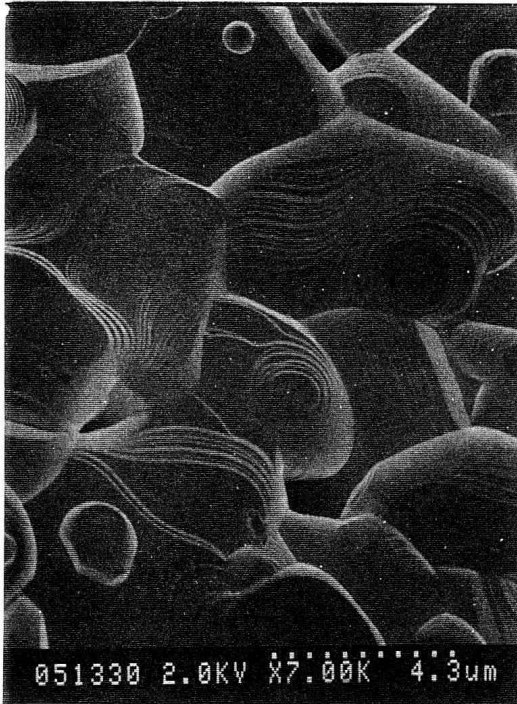


図1-1A 入射電子ビームによる試料からの情報



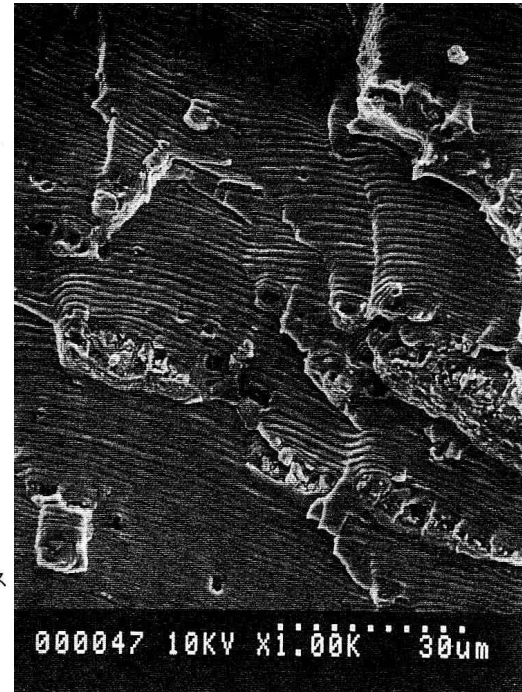
# SEM像の例(1)



(ポイント)

結晶粒の形状，界面の  
状態がよくわかります。

試料：超電導セラミックス

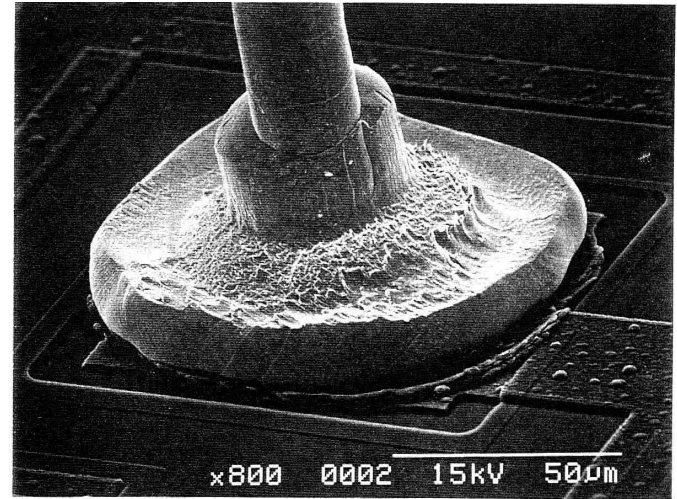
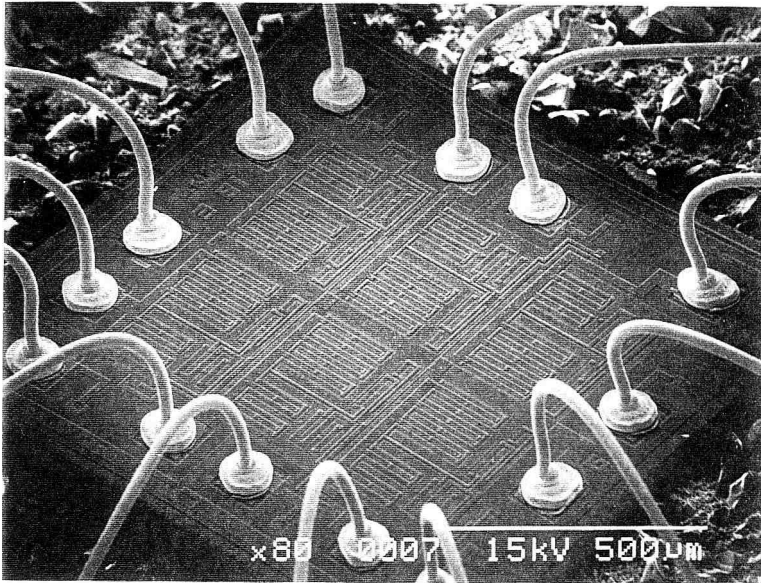


(ポイント)

ストライエーション  
(縞模様)の間隔が金属  
疲労と密接な関係にあり  
ます。

試料：アルミ疲労破面

# SEM像の例(2)



(ポイント)

LSIプロセスの後工程の品質管理(QC, TQC)にも威力を発揮します。

ボンディングの様子がよくわかります。

試料：半導体チップ

# 延性破壊のデンプルの形成

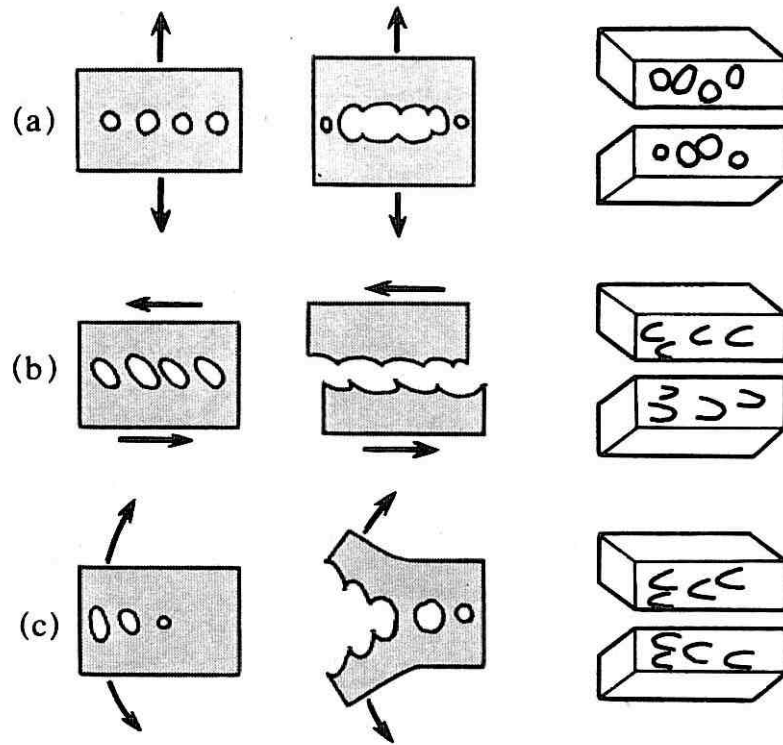
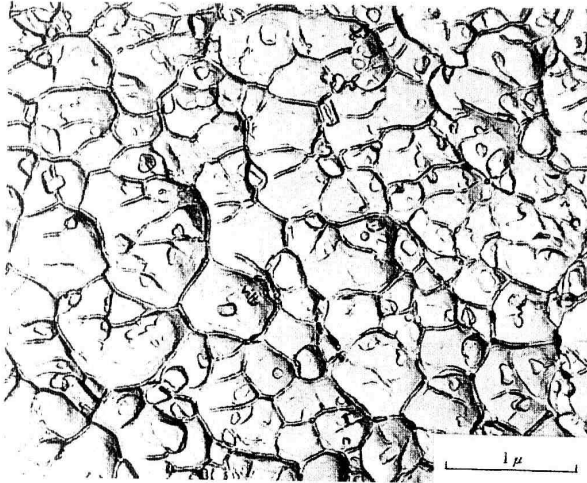


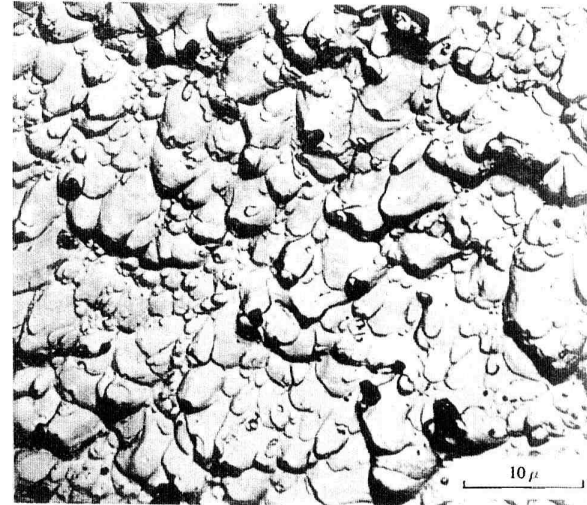
図 1.1 デンプル形成機構 (Beachem<sup>19)</sup>)

- (a) 均一引張り-等軸デンプル
- (b) せん断-伸長形デンプル
- (c) 不均一引張り (引裂き)-伸長形デンプル

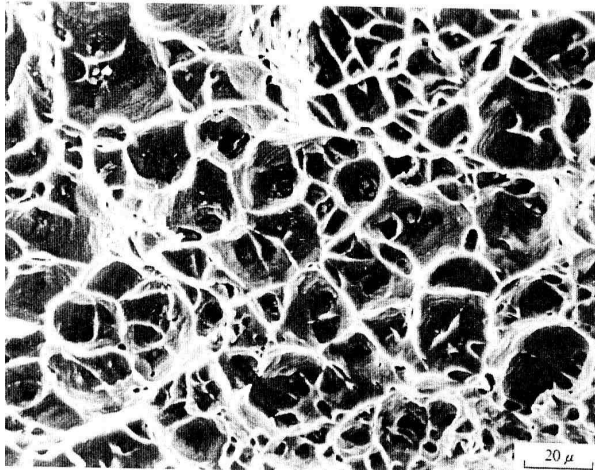
# ディンプル (左 :等軸、右 :伸長形)



(a) レプリカ写真 (7075-T6 アルミニウム合金, Beachem and Pelloux<sup>3)</sup>)

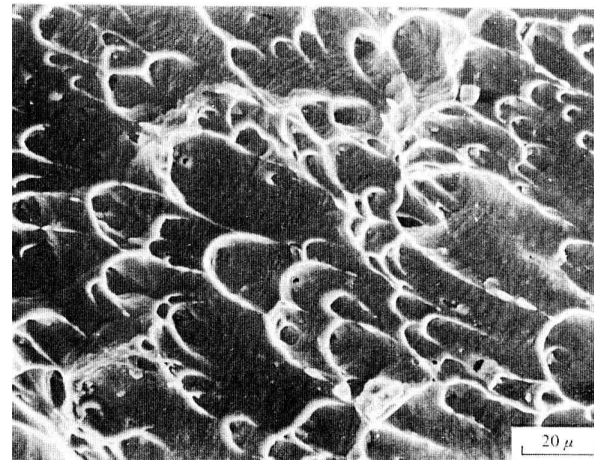


(a) レプリカ写真 (鋼, Beachem and Pelloux<sup>3)</sup>)



(b) 走査電子顕微鏡写真\* (5052-0 アルミニウム合金)

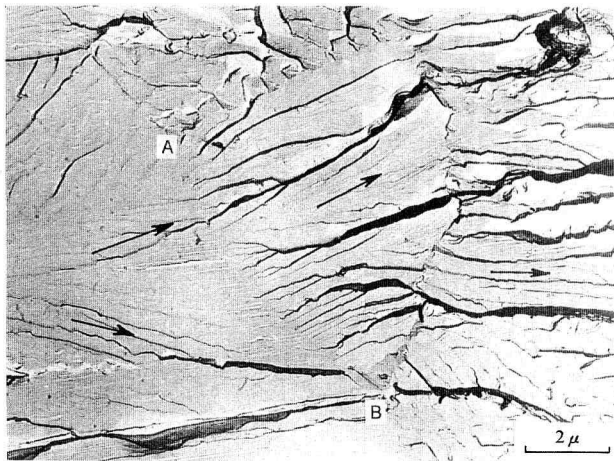
図 1.2 等軸ディンプル



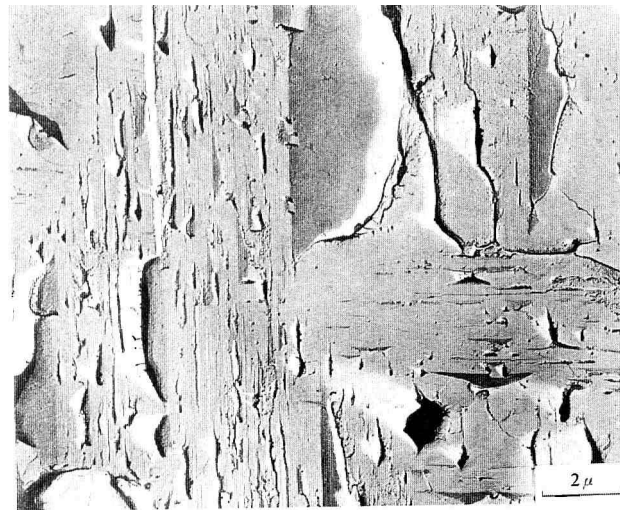
(b) 走査電子顕微鏡写真\* (5052-0 アルミニウム合金)

図 1.3 伸長形ディンプル

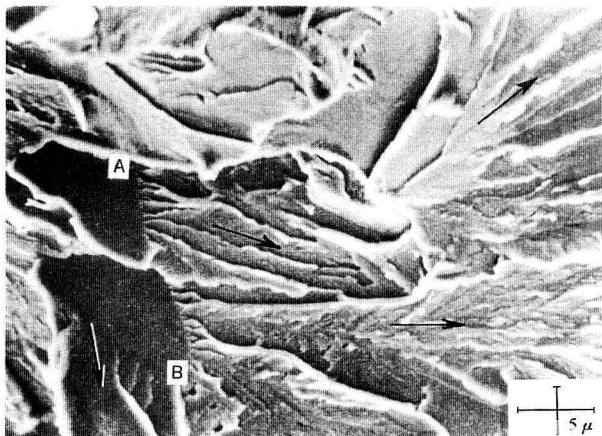
# 脆性破壊の破面 (左 : リバーパターン、右 : タング)



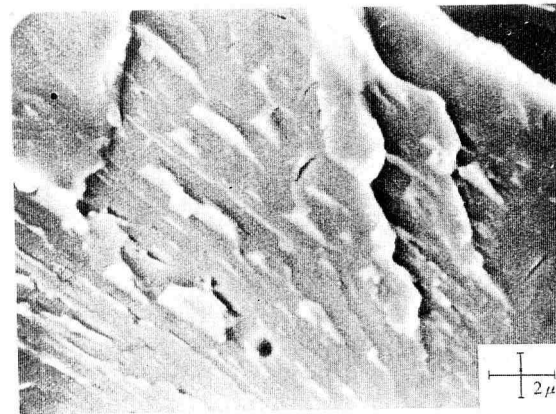
(a) レプリカ写真



(a) レプリカ写真



(b) 走査電子顕微鏡写真\*

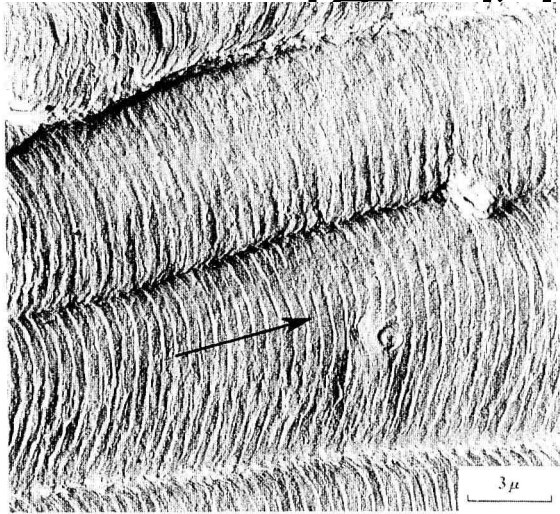


(b) 走査電子顕微鏡写真\*

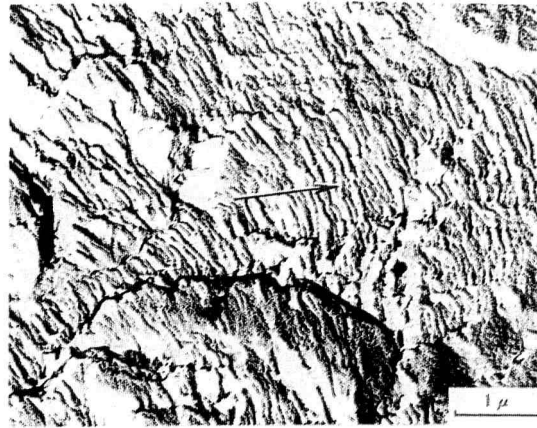
図 1.5 リバー・パターン  
(炭素鋼, 衝撃破壊, AB は結晶粒界, 矢印はき裂伝ば方向)

図 1.6 タング (炭素鋼, 低温衝撃破壊)

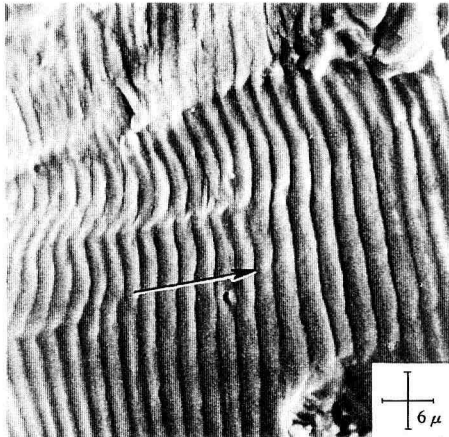
# 疲労破面-ストライエーション (左・アルミ、右 鋼)



(a) レプリカ写真



(a) レプリカ写真



(b) 走査電子顕微鏡写真\*



(b) 走査電子顕微鏡写真\*

図 1.8 延性ストライエーション  
(7075-T6 アルミニウム合金, 矢印はき裂伝ば方向)

図 1.10 ストライエーション状模様 (炭素鋼, 矢印はき裂伝ば方向)

# ストライエーション

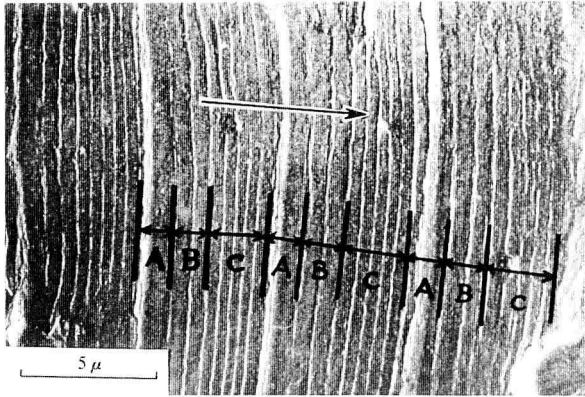


図 5.4 プログラム変動荷重下の疲労破面 (2017-T4 アルミニウム合金、片振引張変動荷重、矢印はき裂伝ば方向を示す)

- 大荷重 1つ、中荷重 2つ、小荷重 5つの荷重パターンでのストライエーションパターン

# ストライエーション間隔と応力拡大係数

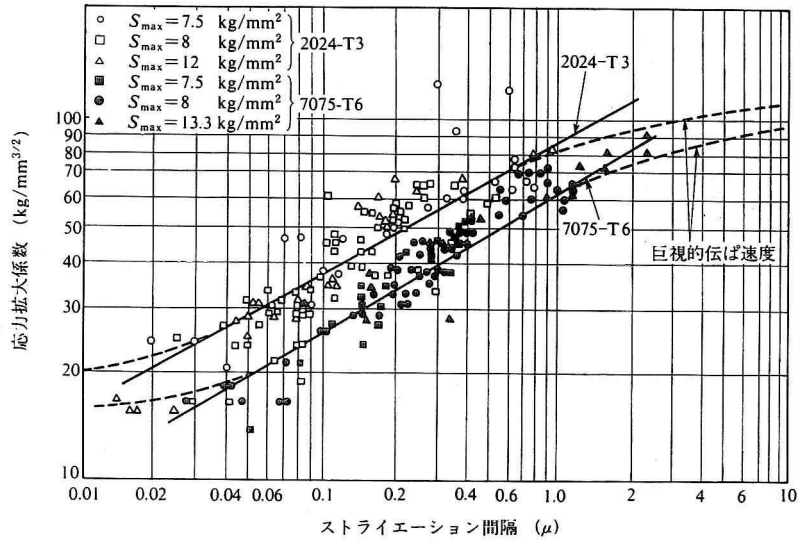


図 5.32 ストライエーション間隔の応力拡大係数による整理例 (Broek<sup>44)</sup>)

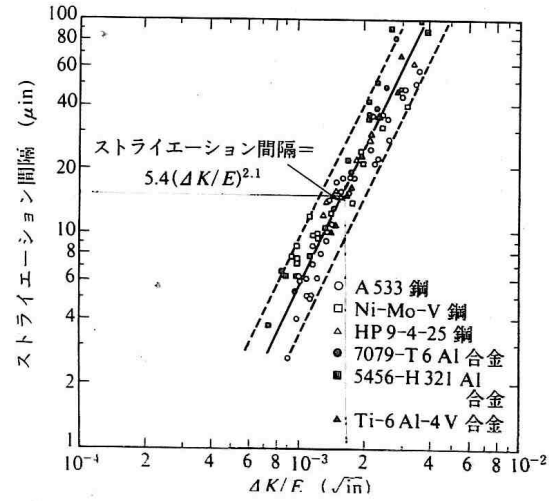


図 5.33 ストライエーション間隔のひずみ拡大係数による整理例 (Bates・Clark<sup>47</sup>)



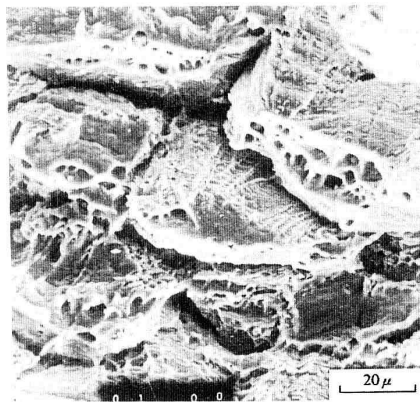
# その他、粒界脆性破面



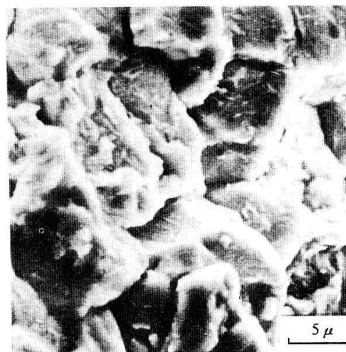
(a) レプリカ写真  
(2219 アルミニウム合金, Pelloux<sup>37</sup>)



(a) レプリカ写真 (岩田ほか<sup>22</sup>)



(b) 走査電子顕微鏡写真  
(310 ステンレス鋼,  
溶接熱影響部, 坂本<sup>21</sup>)



(b) 走査電子顕微鏡写真 (坂本<sup>21</sup>)

図 1.13 粒界ぜい性破面  
(4340 鋼, 水素ぜい化割れ)

# 破面のマクロ観察(1)

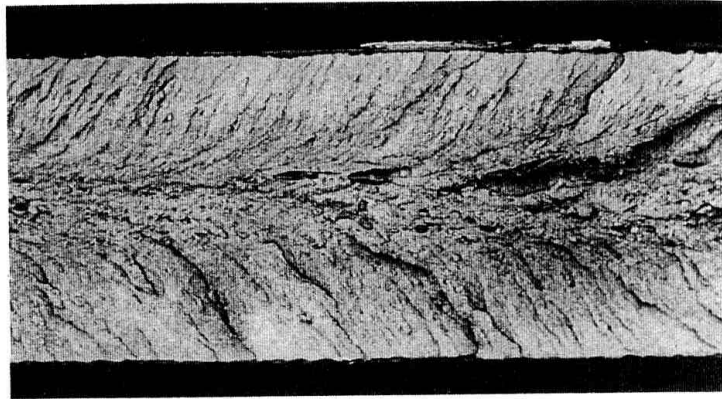


図 4.5 シェフロン・パターン

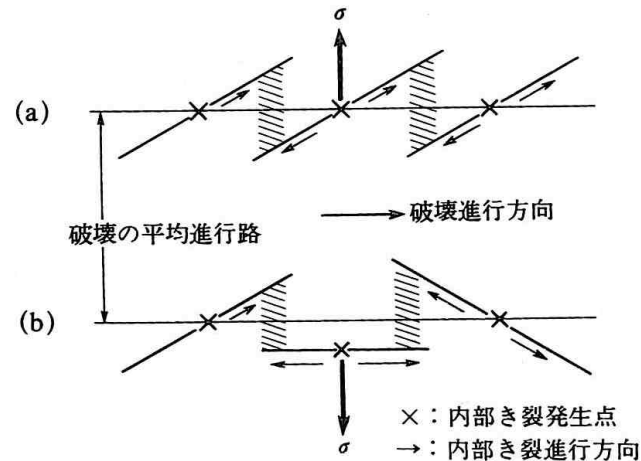


図 4.6 破壊進行の様相

# 破面のマクロ観察(2)

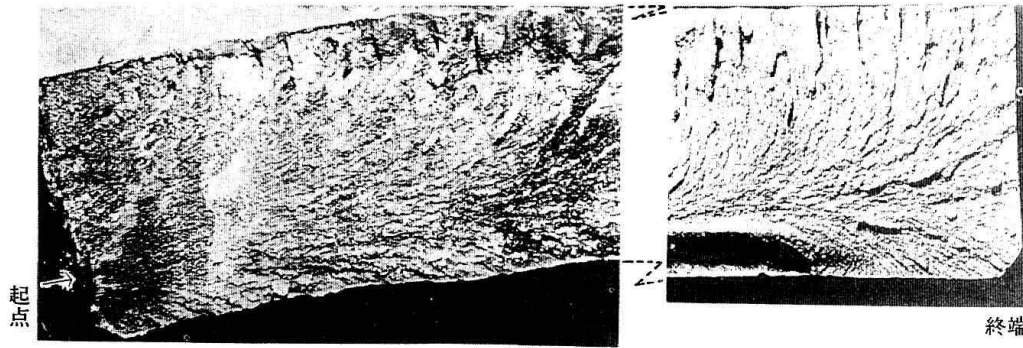


図 9.1 山形模様 (chevron marking) ( $\times 1/2$ )

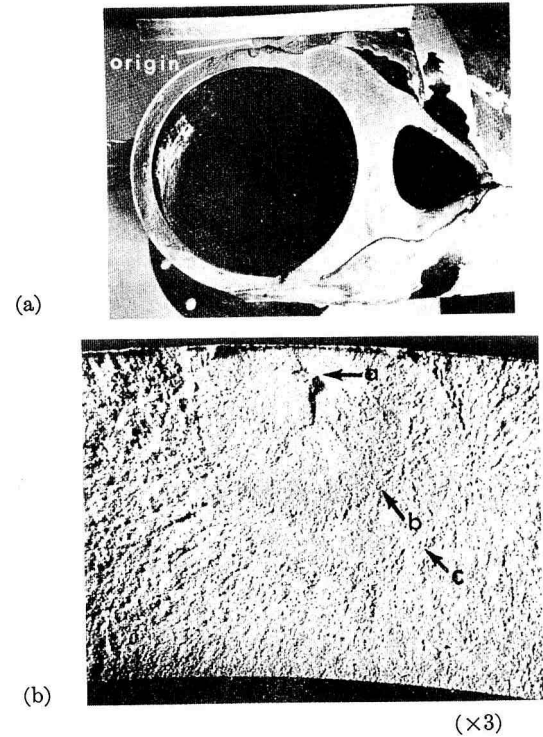


図 9.14 航空機の主脚部品の破面 (Holshouser<sup>5)</sup>)  
(*Metals Engineering Quarterly*, Aug. 1964,  
© American Society for Metals, 1964 より  
転載)