

材料強度設計No.7

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

講義内容 (金属の機械的性質)

(テキスト p148-165)

- 1. 引っ張り試験
- 2. 圧縮試験
- 3. ねじり試験
- 4. 硬さ測定
- 5. 衝撃試験
- 6. 破壊靱性試験
- 7. ひずみ測定
- 8. 応力測定まとめ

工学的応力とひずみ

$$\text{工学的応力 } \sigma = \frac{\text{荷重 } F \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)}{\text{断面積}} \quad (8.1)$$

$$\text{工学的ひずみ } \varepsilon = \frac{\text{長さの変化 } \Delta l}{\text{最初の長さ } l_0} \quad (8.2)$$

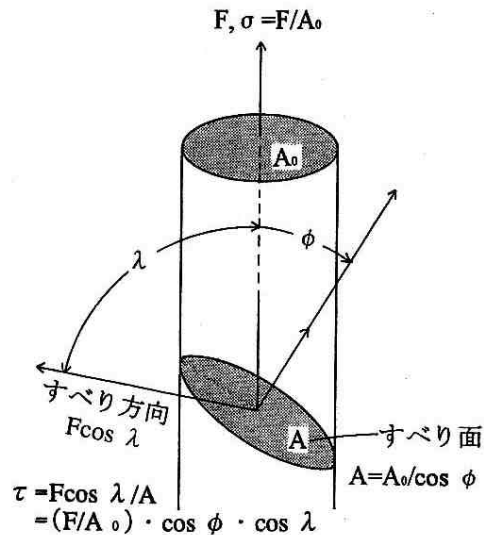
ここで工学的 (engineering) という言葉を用いたのは、後に述べる真応力, 真ひずみと区別するためである。応力とひずみの比 E を弾性率 (modulus of elasticity) と呼ぶ。

$$\text{弾性率 } E = \frac{\text{応力 } \sigma}{\text{ひずみ } \varepsilon} \quad (8.3)$$

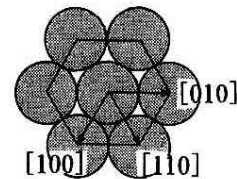
すべり方向の応力

すべり方向のせん断力 $\tau = \frac{F \cos \lambda}{A} = \frac{F}{A_0} \cos \phi \cos \lambda$

$$= \sigma \cos \phi \cos \lambda \quad (8.4)$$



(a) 臨界せん断応力



(b) HCP のすべり方向

図 8.1 結晶のすべり方向

すべりと双晶

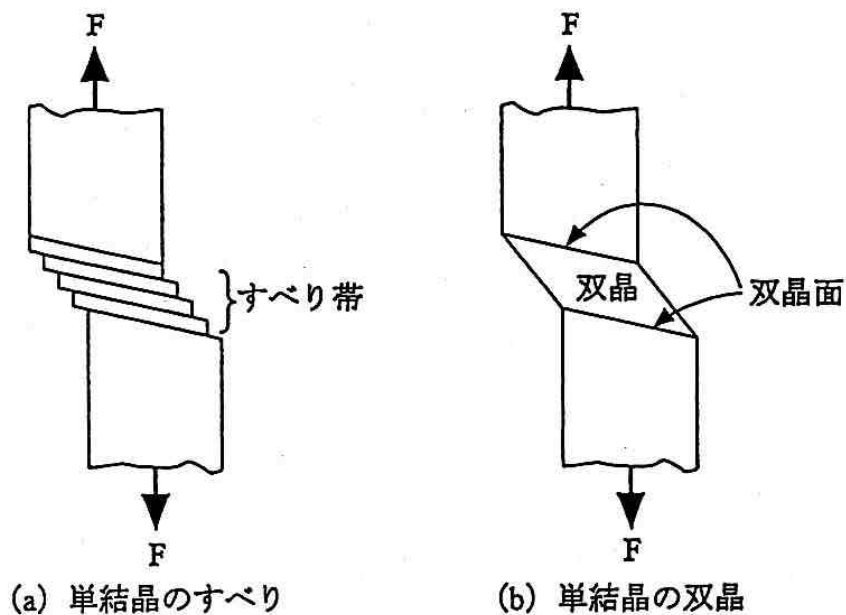


図 8.3 単結晶の塑性変形

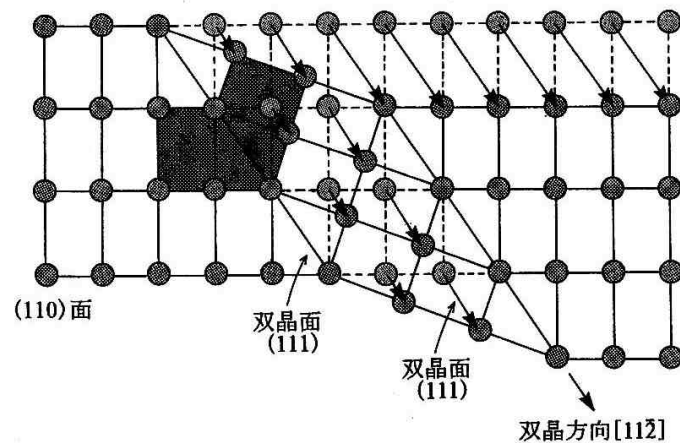


図 8.2 双晶変形
面心立方格子，点線の部分が双晶の生成により塑性変形している。

各種材料試験方法

2・1表 各種材料試験方法の分類.

試験の種類.		試験の方法.	
破壊試験	化学的試験	化学成分の決定, 化学反応に対する性質 (たとえば腐食試験など.)	
	機械的試験	静的強度試験	引張り試験・曲げ試験・せん断試験・圧縮試験・座屈試験・ネジリ試験
		動的強度試験	衝撃試験 (引張り・圧縮・曲げ・ネジリ) 疲レ試験 (引張り・圧縮・曲げ・ネジリ)
		工業的試験	抗折試験・溶接試験・クリープ試験・深絞り試験・エリクセン試験・巻付ケ試験・切削試験・摩耗試験・研削試験
非破壊に近いもの	カタサ	静的カタサ	引掻キカタサ・押込ミカタサ
		動的カタサ	反発カタサ・振り子式カタサ
	金属組織試験	巨視的試験	火花試験
		微視的試験	光学顕微鏡・電子顕微鏡
非破壊試験	機械的試験	表面アラサ試験・弾性試験・表面欠陥試験・内部摩擦	
	物理的試験	音響試験	音波試験・超音波探傷
		光学試験	干渉計・分光分析
		熱学試験	カロリメータ・膨張計・熱伝計・熱容量計
		電磁試験	容量計・伝導度・抵抗・渦流・磁気探傷など.
		照射試験	ガンマ線・X線など.
	浸透検査	油浸透・塗料浸透 (ケイ光)	
化学的試験	スポット分析・微量分析		

引っ張り試験

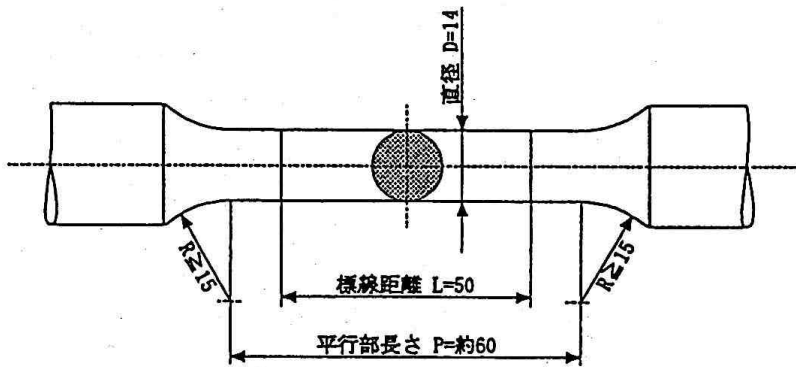


図 8.4 引っ張り試験片の形状 (JIS 4号)

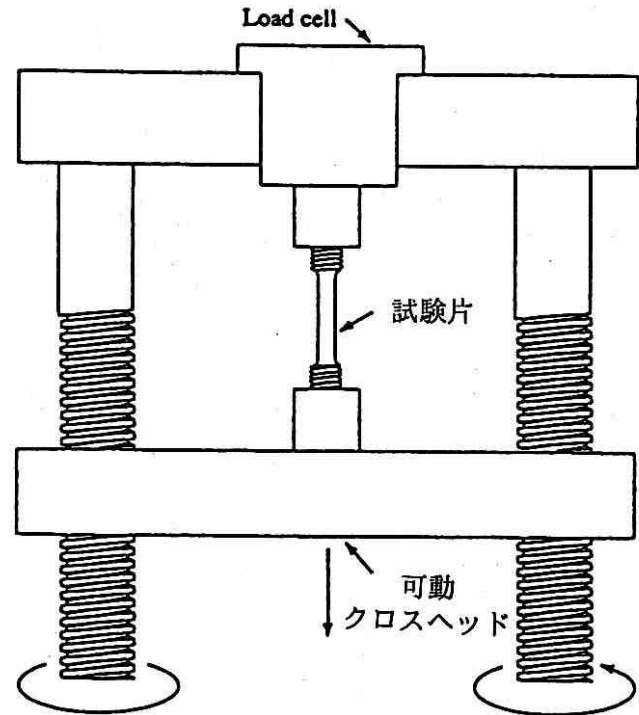


図 8.5 引っ張り試験機

応力-ひずみ線図

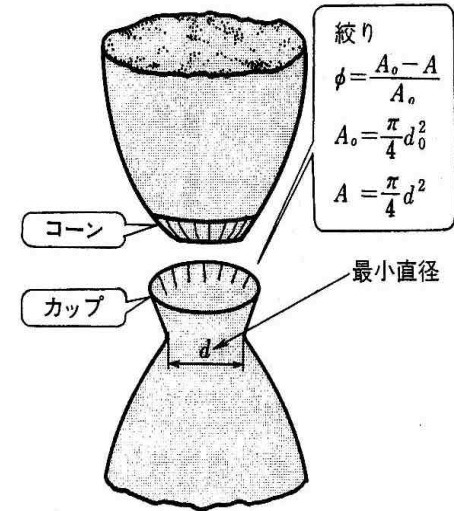
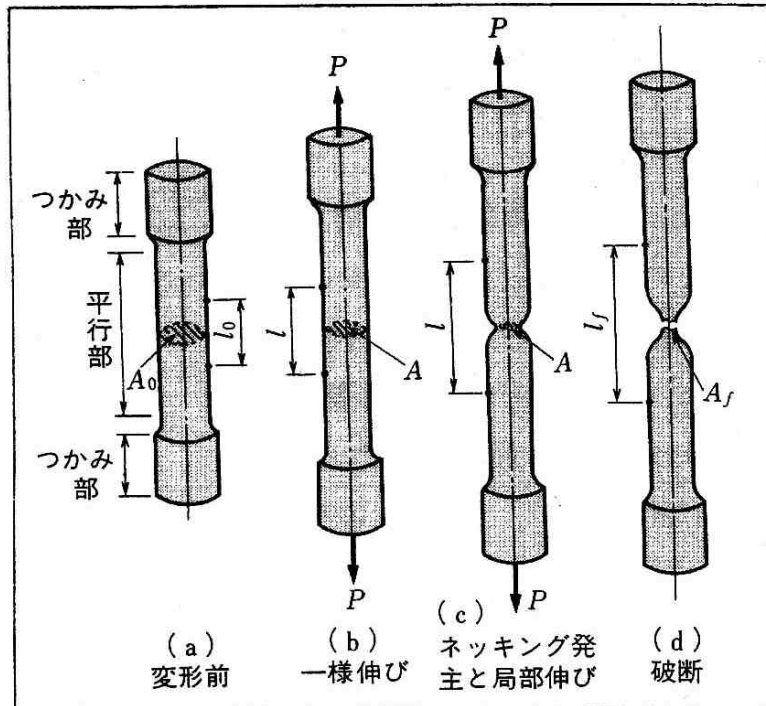
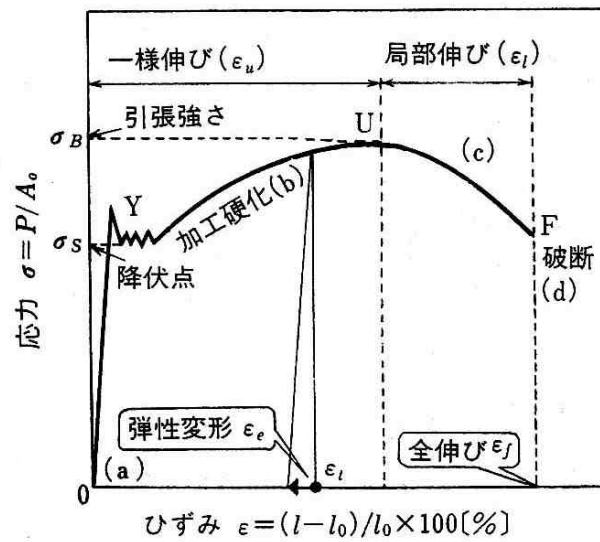


図 4.4 カップアンドコーン形破断をした試験片の絞り

図 4.3 軟鋼の引張応力-ひずみ線図, 引張試験片の

弾性率、応力-ひずみ線図

表 8.3 種々の金属材料の弾性率

材料	弾性率 (10^3MPa)
鉄鋼材料	207
鋳鉄	104~152
Ni 合金	180~207
銅合金	104~
Al 合金	69~76
Mg 合金	45
チタニウム	107
タンゲステン	345
モリブデン	324

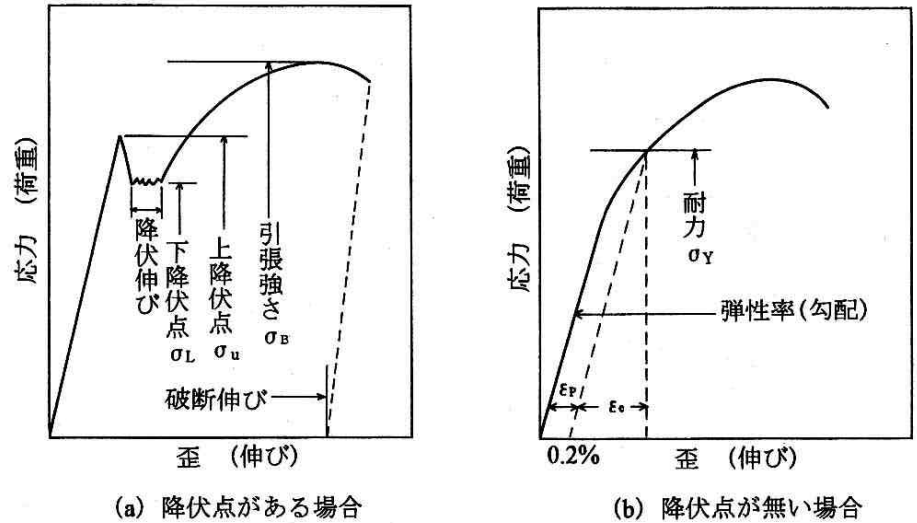


図 8.6 応力-ひずみ曲線

機械的性質(1)

- 1 .引張強さ (σ_B):Tensile Strength
- 2 .降伏点 (σ_Y):Yield Strength
- 3 .耐力 (σ_Y or $\sigma_{0.2\%}$) :Yield Strength at 0.2%
- 4 .上降伏点 (σ_{UY}):Upper Yield Strength
- 5 .下降伏点 (σ_{LY}) :Lower Yield Strength
- 6 .破断伸び (δ):Percent Elongation at Fracture
- 7 .絞り (ϕ):Percent Reduction of Area

機械的性質(2)

e. 破断伸び (percent elongation at fracture) δ

試験片破断後の永久伸びは, l_F は破断後の永久伸び, l_0 は最初の長さとして

$$\delta = \frac{l_F - l_0}{l_0} \times 100 \quad (8.5)$$

f. 絞り (percent reduction of area) φ

試験片破断後における最小断面積とその原断面積の差の原断面積に対する百分率. A_0 は原断面積, A_F は最終破断面積として

$$\varphi = \frac{A_0 - A_F}{A_0} \times 100 \quad (8.6)$$

$$\text{絞り} = \frac{\frac{\pi}{4}(12.5^2 - 11.9^2)}{\frac{\pi}{4}12.5^2} = 0.094 \quad (9.4\%)$$

真応力と真ひずみ

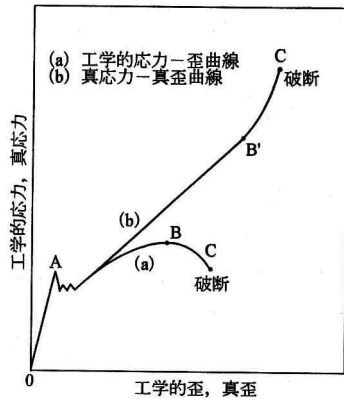


図 8.8 工学的応力-ひずみ曲線と真応力-真ひずみ曲線の比較

ϵ_n は $\Delta l/l_0=1/20.0=0.05$ である。厳密には、真ひずみ ϵ_t は $\Delta l/l_0$ の和である。

$$\sigma_n = \frac{E}{A_0}, \quad \epsilon_n = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (8.8)$$

体積が一定であるから, $A_0 l_0 = A l$ (8.9)

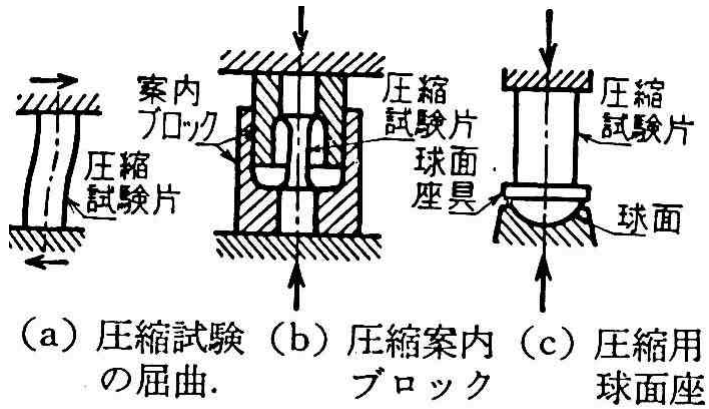
$$\therefore \frac{A_0}{A} = \frac{l}{l_0} = 1 + \epsilon_n \quad (8.10)$$

$$\epsilon_t = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A} = 2.3 \log \frac{A_0}{A} = 2.3 \log(1 + \epsilon_n) \quad (8.11)$$

σ_t と ϵ_t を対数表示で示すと、図 8.10 のように均一塑性変形の領域では直線関係にある。すなわち

$$\log \sigma_t = \log A + n \log \epsilon_t, \quad \sigma_t = A \epsilon_t^n \quad (8.12)$$

圧縮試験



2・6図 圧縮試験

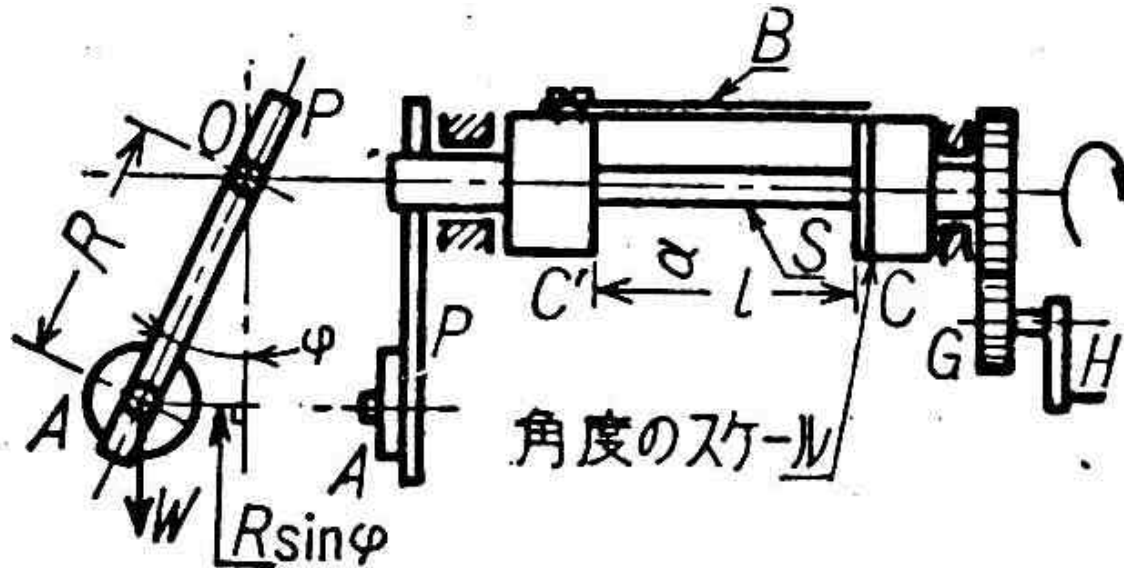
2・2表 圧縮試験片の形状(ASTM).

形状 種類	直径 d (in) (カッコ内はmm 単位.)	長さ l (in) (カッコ内はmm 単位.)	l/d
短い試験片 (軸受合金用)	$1\frac{1}{8} \pm 0.01$ (28.6)	1 ± 0.05 (25.4)	0.89
中間試験片 (金属材料 の圧縮強サ の測定.)	$\frac{1}{2} \pm 0.01$ (12.7)	$1\frac{1}{2} \pm 0.05$ (38.1)	3
	$0.798^{**} \pm 0.01$ (20.3)	$2\frac{3}{8} \pm \frac{1}{8}$ (34.9)	2.98
	1 ± 0.01 (25.4)	$3 \pm \frac{1}{8}$ (76.2)	3
	$1\frac{1}{8} \pm 0.01$ (28.6)	$3\frac{3}{8} \pm \frac{1}{8}$ (85.7)	3
長い試験片 (弾性係数 の測定.)	$0.798^{**} \pm 0.01$ (20.3)	$6\frac{3}{8} \pm \frac{1}{8}$ (161.9)	7.99
	$1\frac{1}{4} \pm 0.01$ (31.8)	$12\frac{1}{2} \text{min}$ (317.5)	10

[注] * 断面積 $\cong 1 \text{ in}^2$ (645 mm²)

** 断面積 $\cong 0.5 \text{ in}^2$ (323 mm²)

ねじり試験



2・10 図 ネジリ試験

硬さ試験

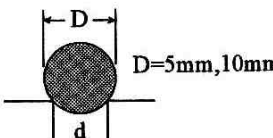
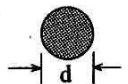
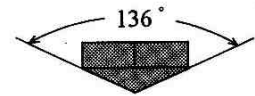
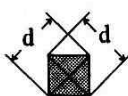
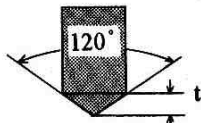

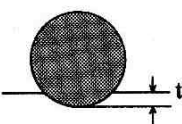

試験方法	側面形状	圧痕形状	荷重	硬さの算出式
ブリネル硬さ	 <p>D=5mm, 10mm</p>		P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
ビッカース硬さ	 <p>136°</p>		P	$VHN = 1.72P/d^2$
ロックウェル硬さ A } C }	 <p>120°</p>		60kg R_A 150kg R_C	$100-500t$
ロックウェル硬さ B			100kg	$R_B = 130-500t$

図 8.11 硬さ試験法

硬さと引張り強さの関連

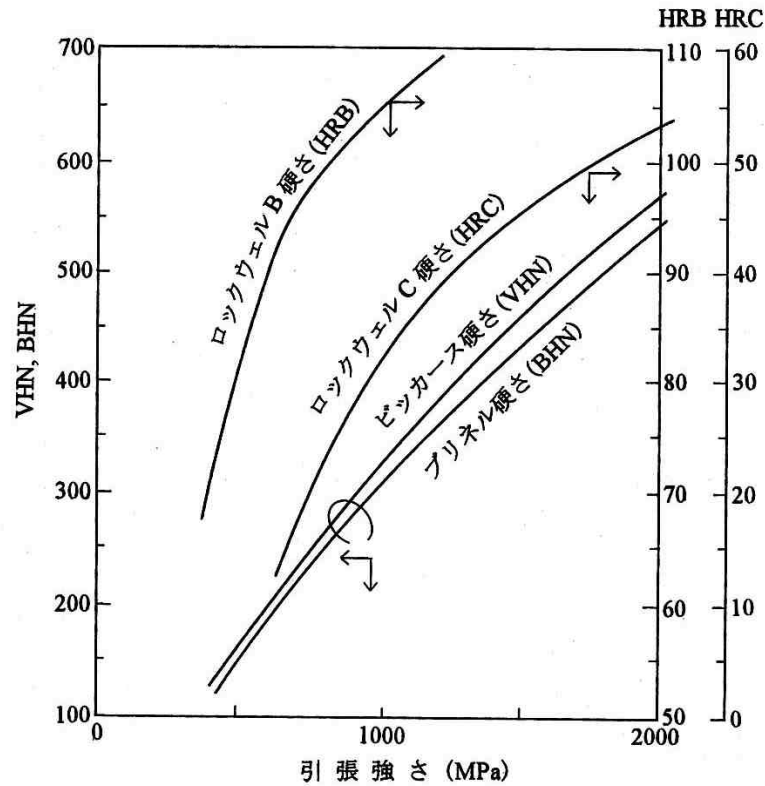
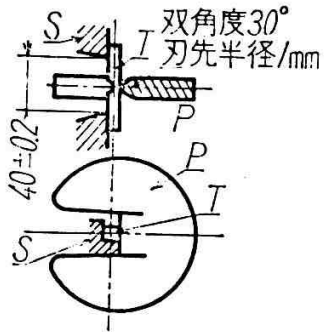


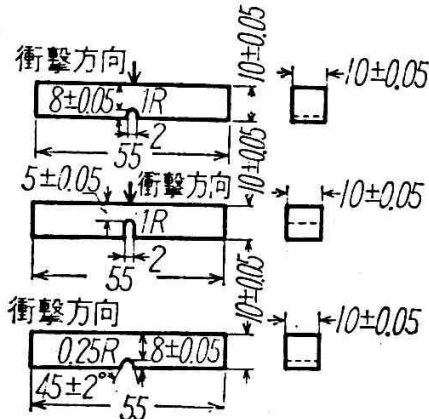
図 8.12 硬度と引張強さの関係

衝撃試験

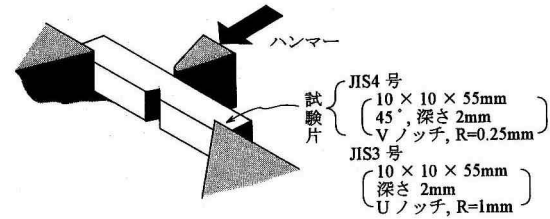


S...試験片支持台, P...
振り子形ハンマ, T...
衝撃曲ゲ試験

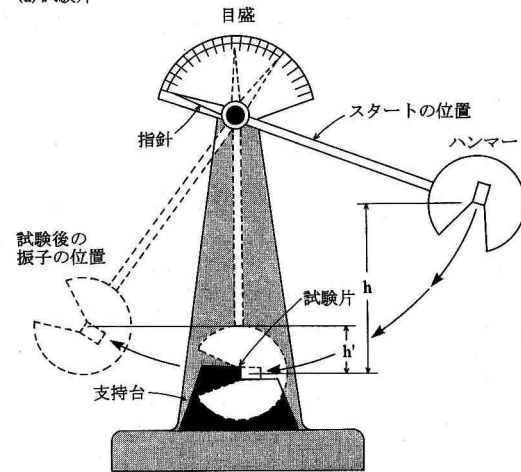
2-22 図 ハンマ



2-23 図 衝撃試験片



(a) 試験片



(b) 試験機

図 8.13 シャルピー衝撃試験法

衝撃試験と試験温度

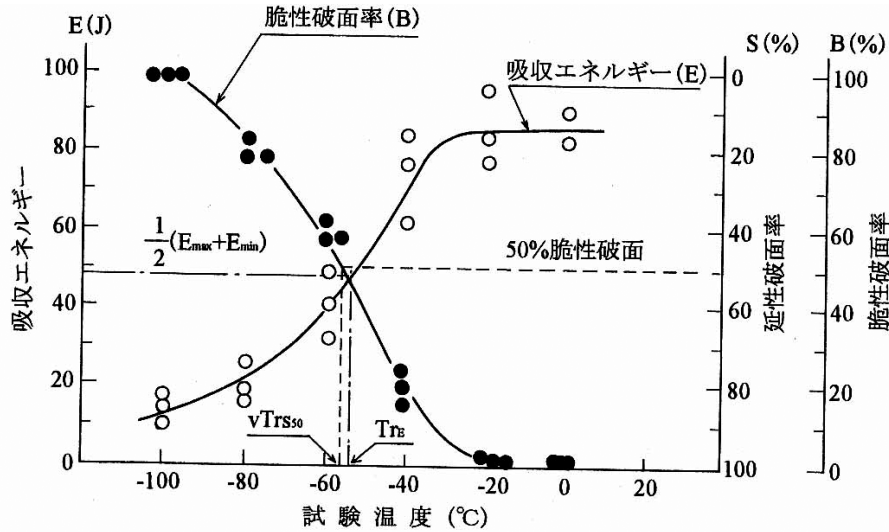


図 8.14 シャルピー衝撃吸収エネルギー、破面率と温度の関係

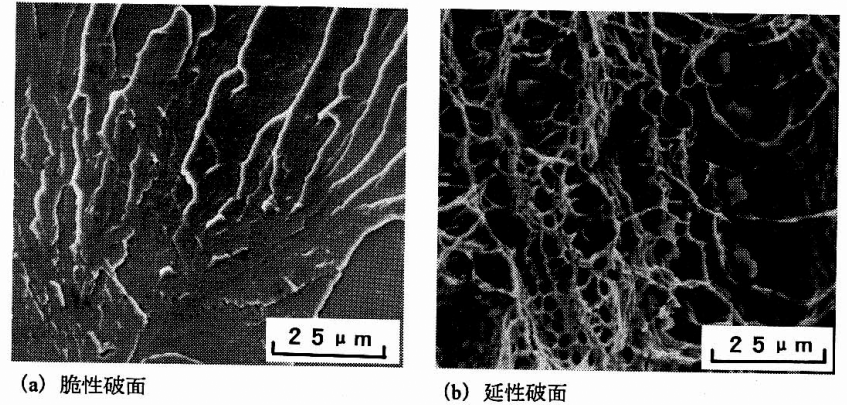
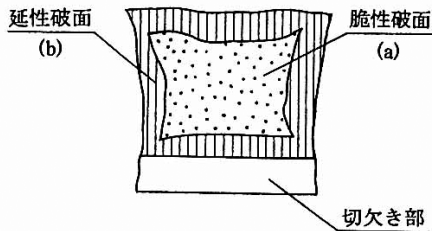


図 8.15 シャルピー衝撃破面の形態



破壊靱性試験(1)

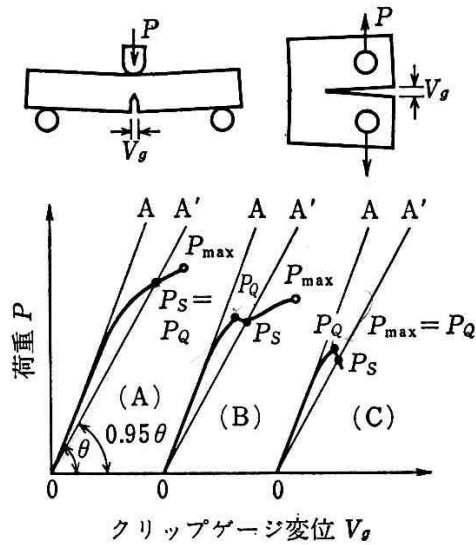
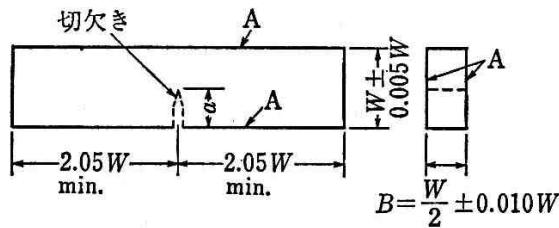


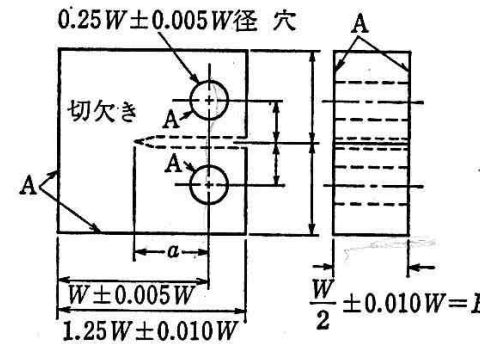
図 4.13 荷重とクリップゲージ変位との関係

(三点曲げ試験片)



面Aは平行度，垂直度が $0.001W$ 以内の面

(小型引張試験片)



面Aは平行度，垂直度が $0.002W$ 以内の面

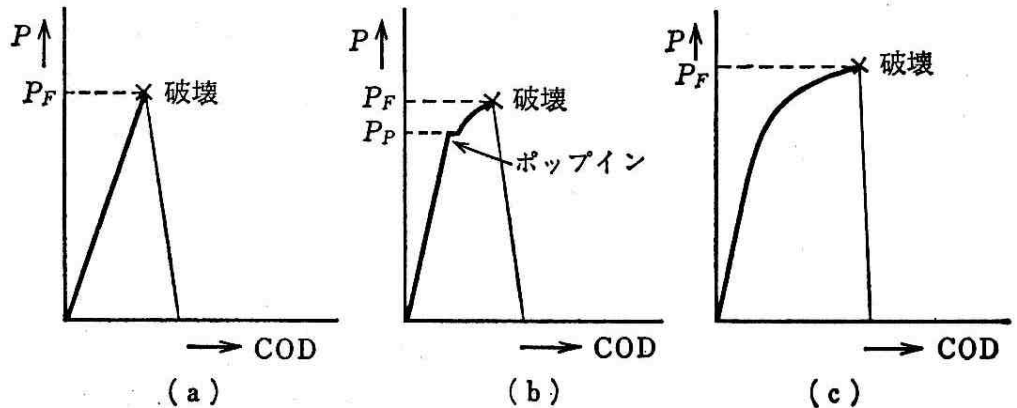


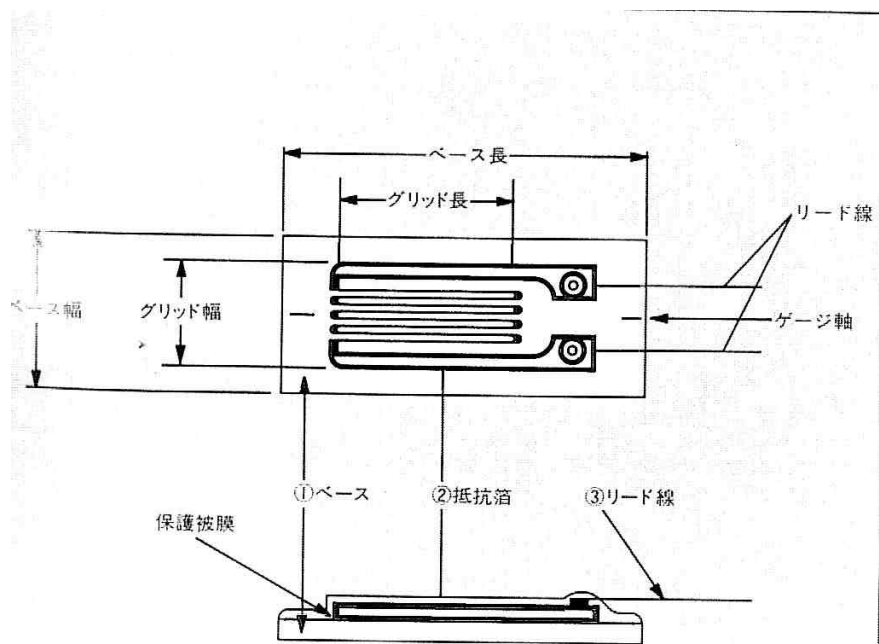
図 4.2 荷重～COD線図

破壊試験(2)-材料の破壊靱性値

表 4.3 各種材料の K_{Ic} 値 (室温)

材 料	熱処理など	降伏応力 σ_Y			破壊靱性 K_{Ic}			最小板厚 B	
		kg/mm ²	ksi	MPa	kg/mm ^{3/2}	ksi√in	MPa·m ^{1/2}	mm	in
鋼 材									
マルエージング鋼									
300 ksi 級	900°F 3 hr 焼もどし	200	285	1962	182	52	56	2.1	0.09
300 "	850°F 3 hr 焼もどし	170	242	1668	300	85	93	7.8	0.31
250 "	900°F 3 hr 焼もどし	181	259	1776	238	68	74	4.3	0.18
4340鋼	焼入れ	185	265	1815	150	43	47	1.7	0.07
A 533 B	圧力容器鋼	35	50	345	≈630	≈180	≈195	810	33
炭素鋼	低強度	24	35	235	>700	>200	>217	2150	82
チタニウム合金									
6 Al-4 V	($\alpha+\beta$)STA	112	160	1099	122	35	38	3	0.12
13 V-11 Cr-3 Al	STA	115	164	1128	89	25	28	1.5	0.07
6 Al-2 Sn-4 Zr-6 Mo	($\alpha+\beta$)STA	120	171	1177	85	24	26	1.3	0.05
6 Al-6 V-2 Sn	($\alpha+\beta$)STA	110	157	1079	120	34	37	3.0	0.12
4 Al-4 Mo-2 Sn-0.5 Si	($\alpha+\beta$)STA	96	137	942	224	64	69	13.6	0.55
アルミニウム合金									
7075	T 651	55	79	540	94	27	29	7.3	0.30
7079	T 651	47	68	461	105	30	33	12.5	0.49
2014	T4	46	65	451	90	26	28	9.6	0.40
2024	T3	40	57	392	110	31	34	19.0	0.75

ひずみゲージ



ひずみゲージの選び方

ゲージパターン	形式	用途
	N11-	広範囲なひずみ測定用
	N21-	二軸応力場のひずみ測定・温度補償を行う時使用
	N22-	N21-形と同じ用途 下側になっているゲージの温度ドリフトに注意
	N31-	ロゼット解析用 ひずみ勾配が大きいと誤差が
	N32-	N31-と同じ用途 下側になっているゲージの温度ドリフトに注意
	Z23-	ねじりひずみ、トルク測定用
	N51-	局部ひずみ測定、応力集中測定用
	R51-	

動ひずみ計



計測ブロック

ひずみゲージ式変換器

土木変換器

ひずみゲージ ブリッジボックス

AS1103

レコーダ

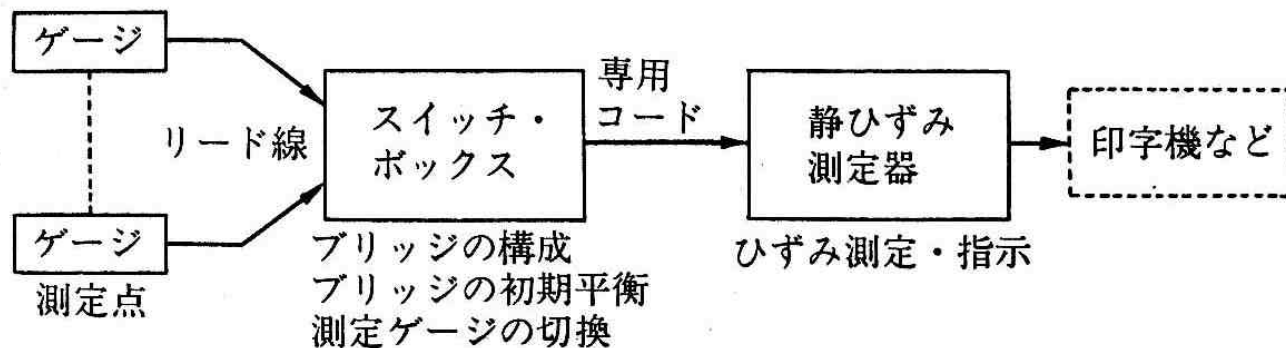
データ処理解析装置

データロガー

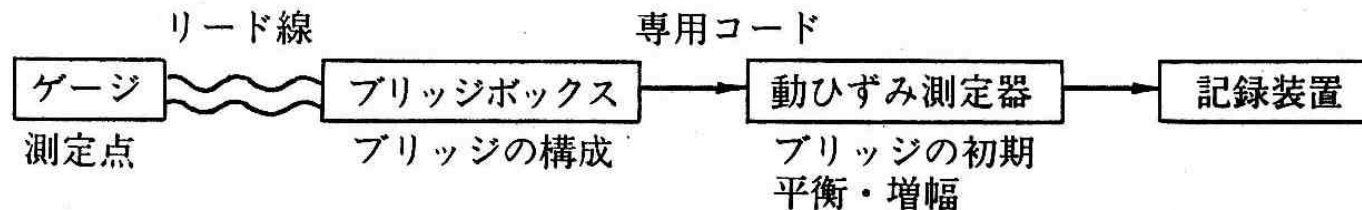
データレコーダ等

AS1103

ひずみの測定系



(a) 静ひずみ測定システム



(b) 動ひずみ測定システム

図5.2 電気抵抗ひずみ計の測定系

ブリッジ回路

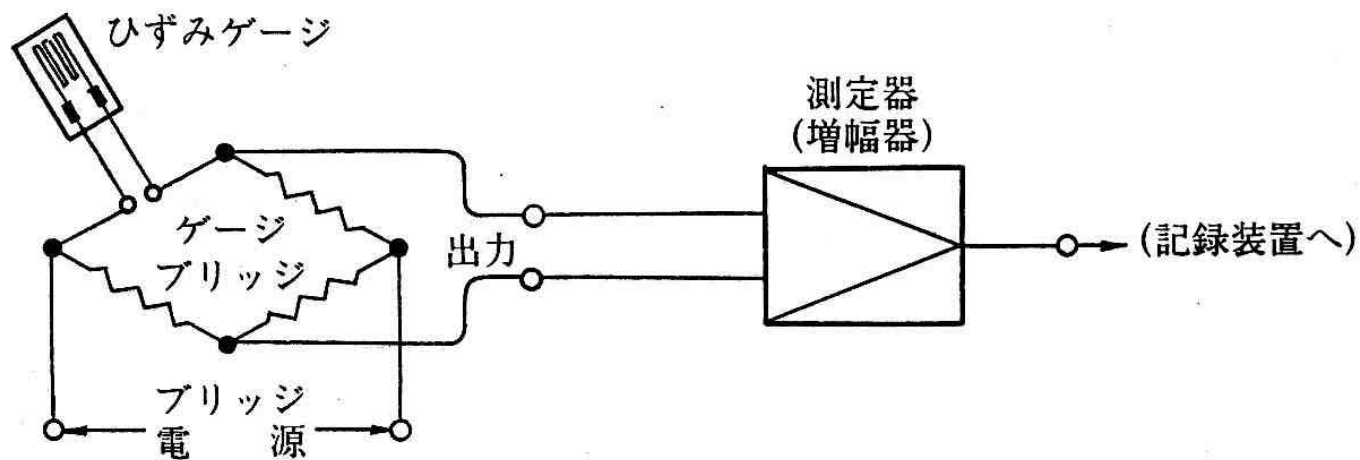
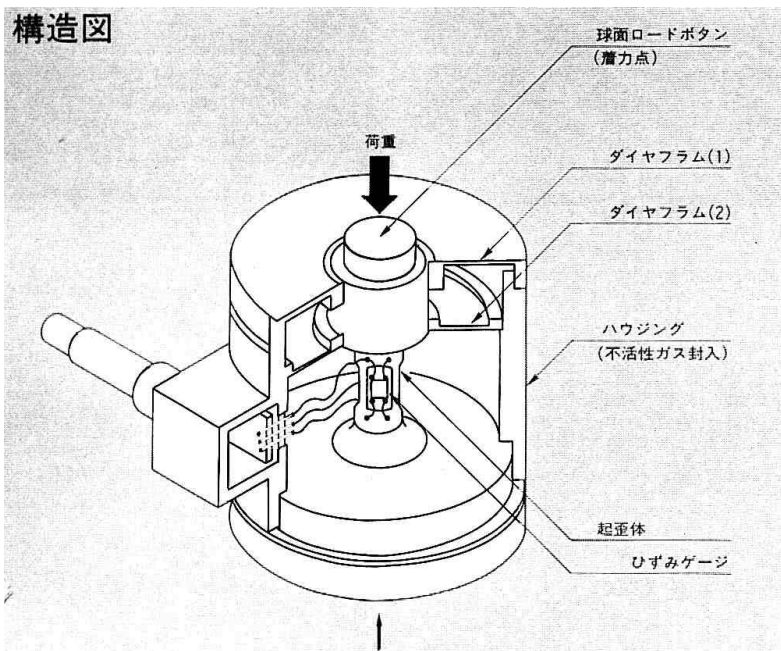


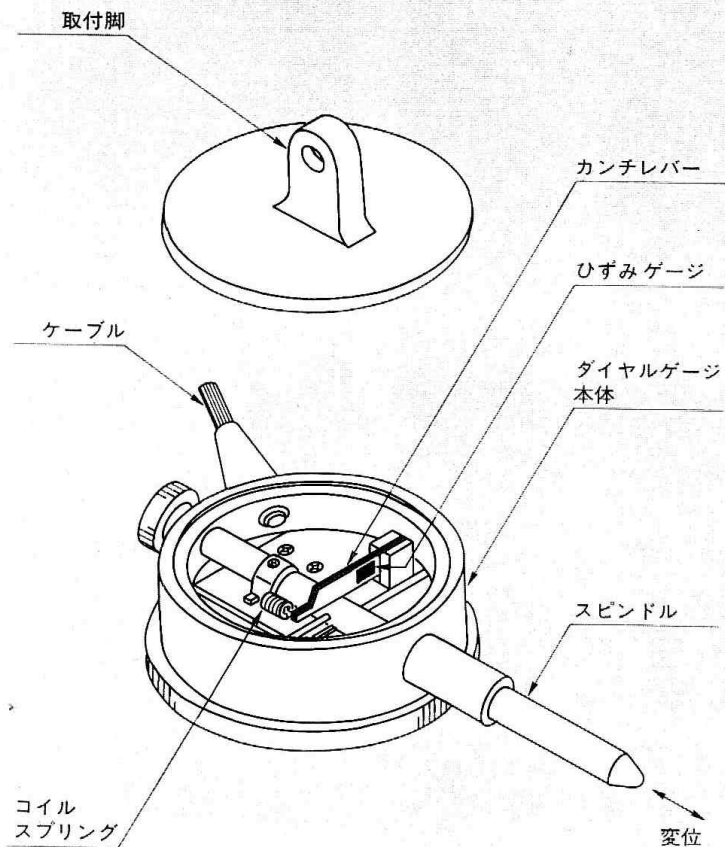
図5.3 ブリッジ回路

ひずみゲージを利用した圧力計 (左) 変位計 (右)

構造図

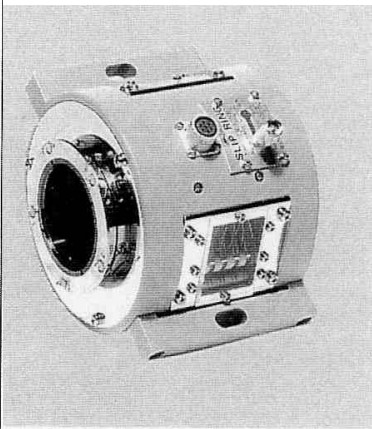
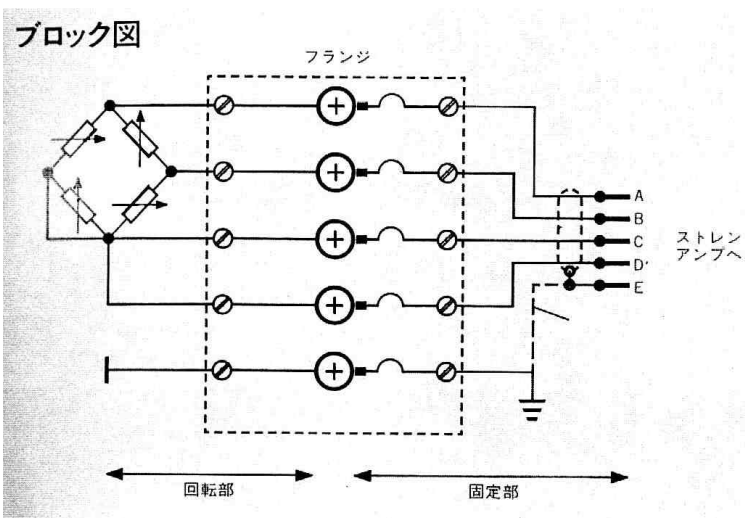


構造図

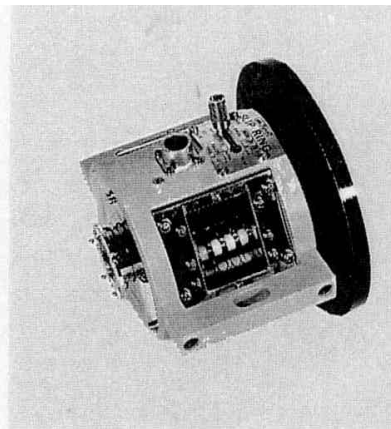


回転体のひずみ測定-スリップリング

ブロック図



● 中間軸形



● 軸端形

主応力

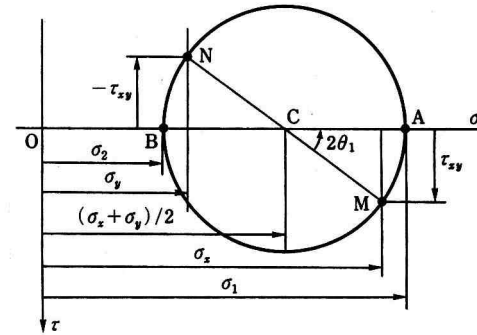
1. 主応力

せん断応力 $\tau=0$ となって消滅する面を主平面 (principal planes) といい、このときの垂直応力を主応力 (principal stress) という。主応力 σ_1, σ_2 とおくと

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= (\sigma_n)_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_2 &= (\sigma_n)_{\min} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2} \end{aligned} \right\}$$

最大せん断応力 τ_{\max} は

$$\tau_{\max} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2}$$



モールの応力円

ひずみから応力 (主応力方向が既知) 平面応力

平面応力状態：平面応力状態は垂直応力 σ_x, σ_y , せん断応力 τ_{xy} 以外の応力成分は 0 となる応力状態と定義された。このとき x 軸方向のひずみは, x 軸方向の応力によるひずみ σ_x/E と y 軸方向の応力によるひずみ $-\nu\sigma_y/E$ の和で,

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x - \nu\sigma_y}{E} \quad (7.29)$$

となる。同様に, y 軸方向のひずみは,

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y - \nu\sigma_x}{E} \quad (7.30)$$

となる。せん断ひずみは, 式 (7.28) と同様に,

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (7.31)$$

と与えられる。式 (7.29)~(7.31) を書き換えると,

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_x + \nu\epsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_y + \nu\epsilon_x)$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (7.32)$$

これらの式は, ひずみ計測により得られたひずみ値より, 応力値を求めるのに使われる。

平面ひずみの場合の応力とひずみ

平面ひずみ状態：平面ひずみ状態とは、垂直ひずみ ε_x , ε_y , せん断ひずみ γ_{xy} 以外のひずみ成分は 0 となるひずみ状態である。垂直ひずみは伸び縮みのひずみであり、対応する応力の作用が必要であるが、これら応力により z 軸方向にもひずみを生じる。このひずみを打ち消すために、 z 軸方向に応力 σ_z をかけねばならない。すなわち、

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\sigma_z - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) = 0$$

したがって、

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (7.33)$$

この応力によるひずみを式 (7.29), (7.30) のひずみに重ね合わせて、次式を得る。

$$\varepsilon_x = \frac{1-\nu^2}{E}\left(\sigma_x - \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_y\right), \quad \varepsilon_y = \frac{1-\nu^2}{E}\left(\sigma_y - \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_x\right) \quad (7.34)$$

せん断ひずみ γ_{xy} はずれの変形であり、対応する応力 τ_{xy} より、

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (7.35)$$

式 (7.34), (7.35) を書き換えると、

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left(\varepsilon_x + \frac{\nu}{1-\nu}\varepsilon_y\right) \\ \sigma_y &= \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left(\varepsilon_y + \frac{\nu}{1-\nu}\varepsilon_x\right) \end{aligned} \quad (7.36)$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy}$$

主ひずみ

【例題 7.5】 ひずみ計測において、よく使われるロゼットゲージは図 7.9 (d) に示すように各ゲージが 45° をなしている。せん断ひずみ、主ひずみおよび主方向を求めよ。

(解) $\theta_a=0^\circ$, $\theta_b=45^\circ$, $\theta_c=90^\circ$ を式 (7.21) に代入して、 ε_x , ε_y , γ_{xy} について解くと、

$$\varepsilon_x = \varepsilon_a, \quad \varepsilon_y = \varepsilon_c, \quad \gamma_{xy} = 2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c \quad (7.24)$$

これらを式 (7.22), (7.23) に代入して、

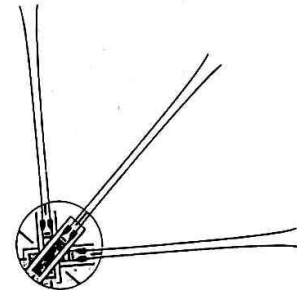
$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \left\{ \left(\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{2} \right)^2 + \left(\varepsilon_b - \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (7.25)$$

$$\tan 2\theta_n = \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad (7.26)$$

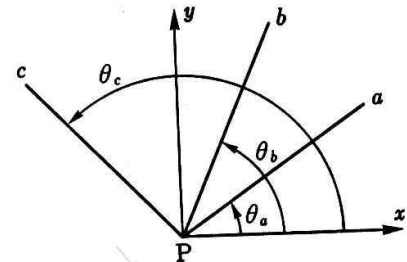
$$\varepsilon_a = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cos 2\theta_a + \frac{1}{2}\gamma_{xy} \sin 2\theta_a$$

$$\varepsilon_b = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cos 2\theta_b + \frac{1}{2}\gamma_{xy} \sin 2\theta_b \quad (7.21)$$

$$\varepsilon_c = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cos 2\theta_c + \frac{1}{2}\gamma_{xy} \sin 2\theta_c$$



(d)



ひずみ状態の計測

応力測定法まとめ(1)

1。ひずみゲージによる応力測定（外力、内力）：

(1)静的外力：ひずみゲージを貼った状態の歪みを0とし、負荷させてひずみを計測。

(2)動的外力：歪みゲージを貼った状態の歪みを0として、負荷状態でひずみを計測。

(3)内的応力（残留応力）：貼った初期はひずみを0として、ひずみゲージの部分を切り出し、その解法されるひずみを求める。その解法ひずみの符号を逆にして内的応力を求める。

切り取り法、Sachs 法、Holl Drilling 法などがある。

応力測定法まとめ(2)

2。光学的方法（外力）：

- (1)光弾性法：透明な材料に応力をかけると透過する光が復屈折する性質を使う。測りたい形状のプラスチックなどを用意して、偏光された光の干渉によって生じるしま模様 of 字数が主応力差に比例する事で求められる。
- (2)モアレ法：試料表面に彫刻あるいは印刷した格子を施す。試験片格子が荷重により、変形するので、その格子と、基準格子との光の干渉によるしまを計測して応力を求める。

応力測定法まとめ(3)

3。X線応力測定（内力）：

結晶面にX線をあて、隣り合う2面からの反射波が次の結晶間隔 d とX線の波長の関係となれば、干渉して強めあう。

$$2 d \sin \theta = n \lambda$$

この反射波のピークを求めて、残留応力を求める。

4。超音波法（内力）：

材料に応力が加わると、入射超音波には復屈折が生じる。材料に2方向に偏光させた2つの超音波の伝播速度差が主応力差に比例することを利用して応力を求める。

光弾性法

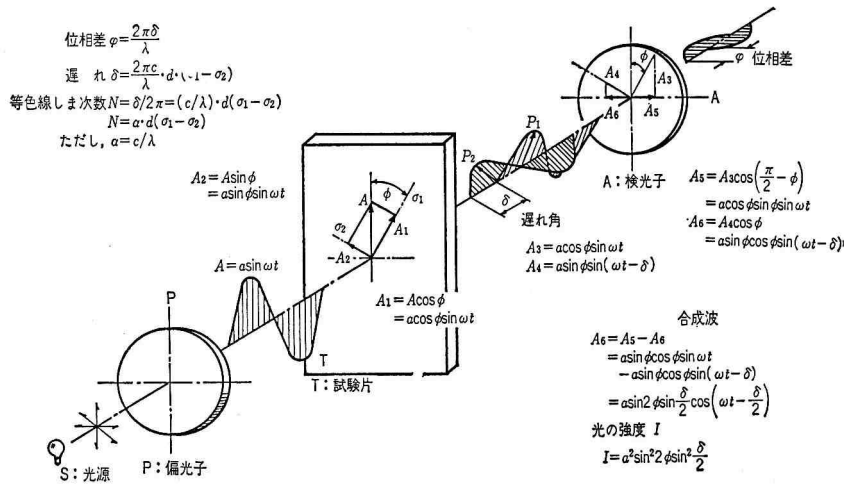
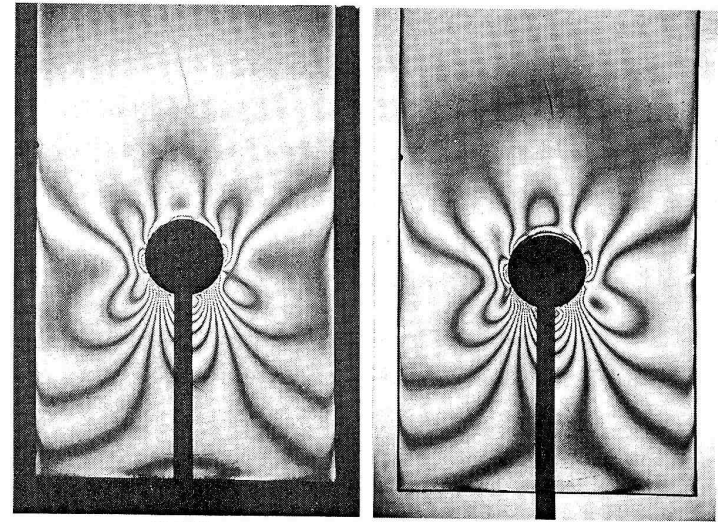
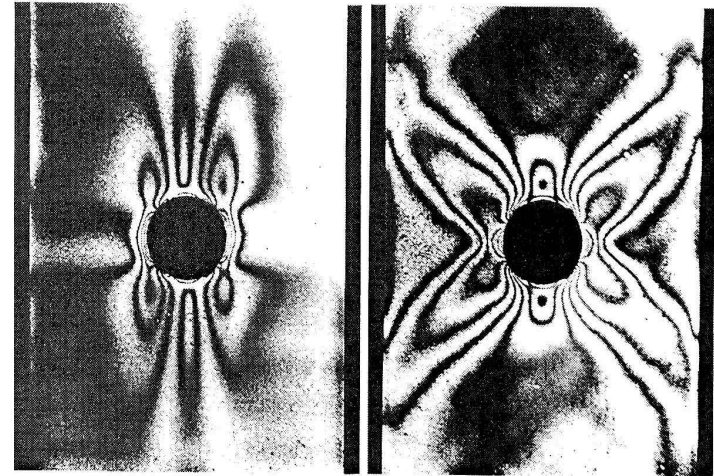


図 4.4 平面偏光器と光の状態



暗視野 明視野
 ピン荷重を受けた部材のモデル光弾性法の等色線しま模様



0°/90° ±45°
 複合材料有孔帯板の光弾性被膜法による等色線しま模様

図 5.5 光弾性法における等色線しま模様例

応力塗料法

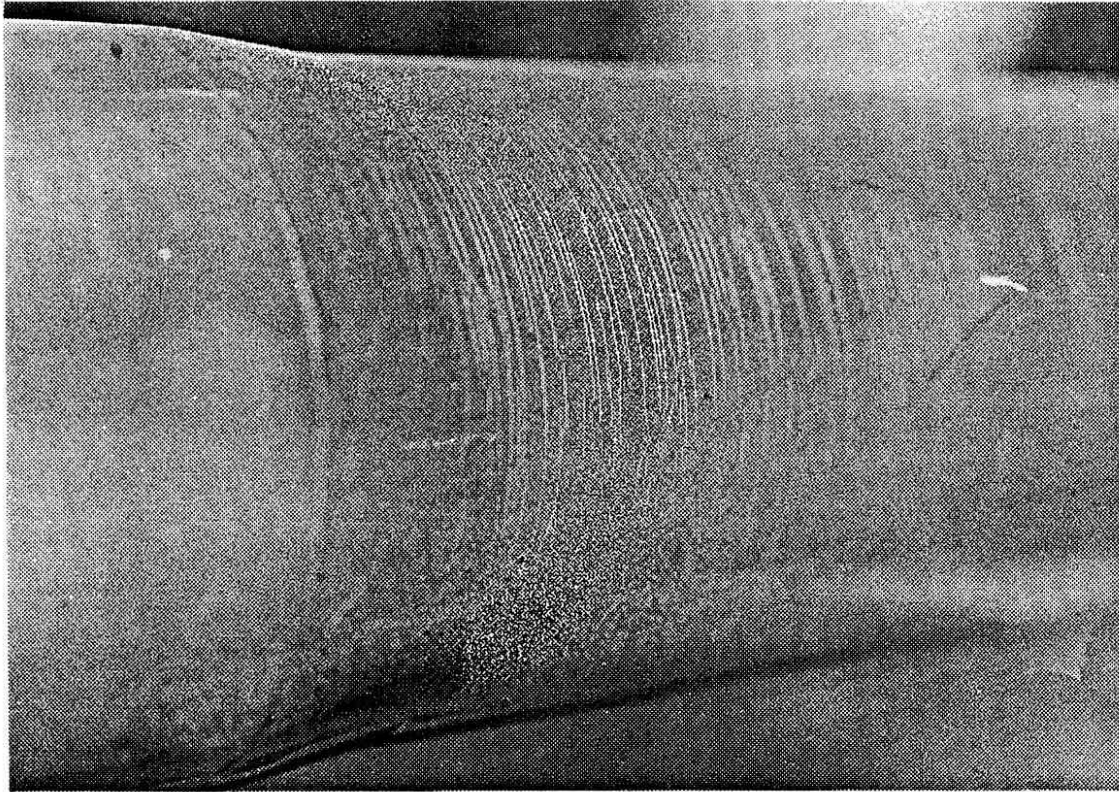


図5.9 複合材料製小型ロケットの曲げ試験で得られた
応力塗料膜の亀裂模様