

計測情報処理

5. 表面と力学的量 の測定

計測システム研究室 章 忠

4. 物体(長さ, 距離)を測る

4.1 距離を測る

4.1.1 立体間隔や反射をなった計測方法

- 1)三角測量、2)光パルス伝播時間測定、3)強度変調光の位相測定、
4)光波干渉計

4.1.2 目視測

- 1)目視による距離計測、2)3次元位置のステレオ計測

4.1.3 距離による計測方法の違い

- 1)遠距離を測る(100Km以上)、2)中距離を測る(数十km～100m)、
3)近距離を測る(100～10m)

4.2 長さを測る

4.2.1 直接法と間接法

4.2.2 読み取り目盛りの拡大

- 1)バーニア目盛り、2)機械的拡大、3)光てこによる拡大、4)光波干渉による拡大、5)電気的拡大、6)デジタル化

4.2.3 接触測定一測長機

5.1 表面を測る

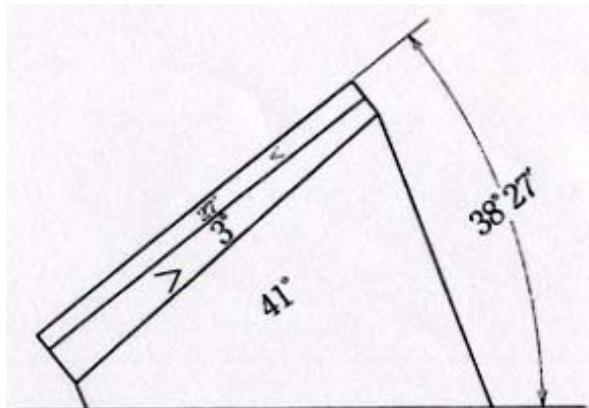
1) 角度を測る

角度の標準: SI単位系 ラジアン(rad) $360^\circ = 2\pi \text{ rad}$

(a) 角度ゲージ

いろいろに作られた角度ゲージがある。

例:N.P.L式角度ゲージ

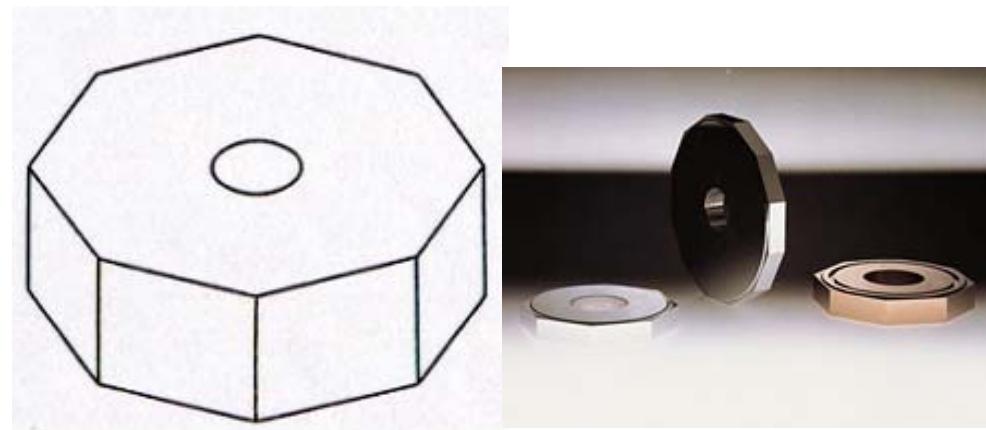


測定面の大きさ: $89 \times 16 \text{ mm}$
精度: 呼びの角度に対して $\pm 2\text{秒}$
12個のセット: $1, 3, 9, 27, 41$ 度
 $1, 3, 9, 27$ 分
 $3, 9, 27$ 秒

(b) ポリゴン鏡

ガラスまたは金属製の多角柱状の角度定規である。割り出し円テーブル、その他割り出し装置の割り出し精度の測定に用いる。

オートコリメータとの併用で精度は1秒程度である。



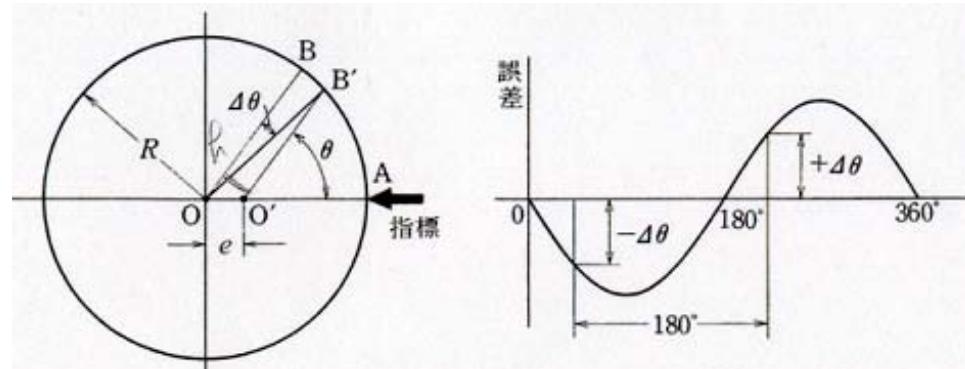
(c) 目盛円盤

円板の円周に等間隔の目盛りをつけたものである。

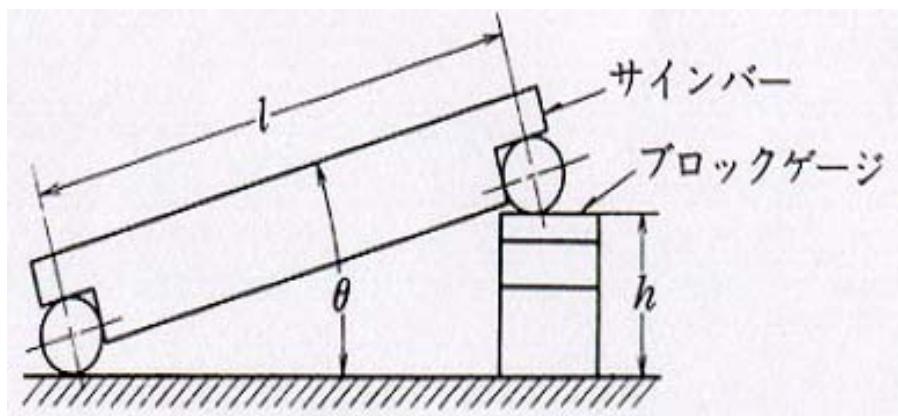
目盛円板の誤差

- ・目盛線位置のくるいによる誤差
- ・偏心による誤差

Oは目盛の中心, O'は回転の中心で $OO' = e$ の偏心誤差がある。



(d) サインバー



適当なブロックゲージの組み合わせを用いて、任意の角度を設定することができる。

$$\sin \theta = \frac{h}{l}$$

$$\text{誤差 } \Delta\theta = 206\,000 \left(\frac{\Delta h}{h} - \frac{\Delta l}{l} \right) \tan \theta$$

45° 以下で使うべき。

(e) 割り出し台, 割り出し円テーブル

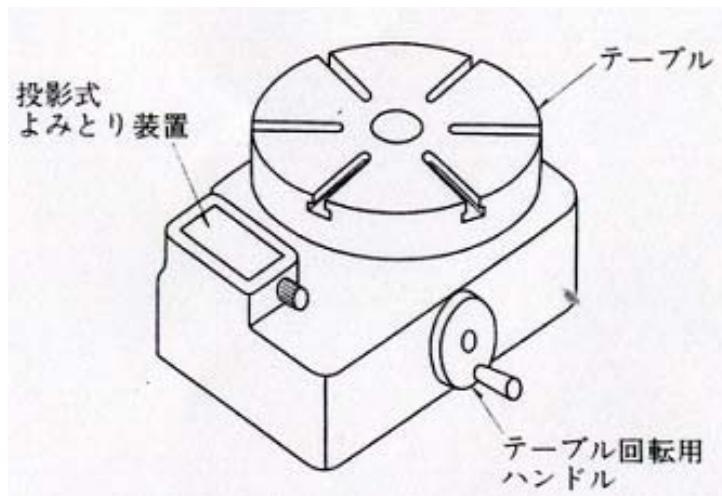
割り出し台: フライス盤のテーブルなどに取付けて、歯車や治具の割り出し作業に用いるほかに、測定用にも用いられる。

工作用: 工作物を回転し、回転角度を目盛円板で読み取る。

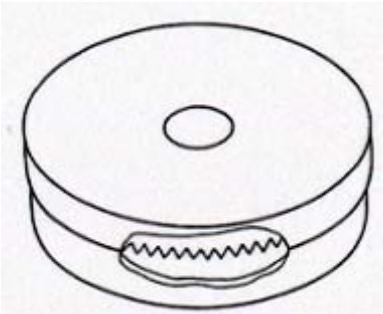
測定用: 内部にガラス製目盛円板を備え、目盛を読みとり
顕微鏡または投影式読み取り装置によって読み取
る(光学的割り出し台)。

割り出し円テーブル: スピンドルが垂直で回転テーブル上に工作物または被測定物を固定して角度の割り出しを行う。

割り出し円テーブル



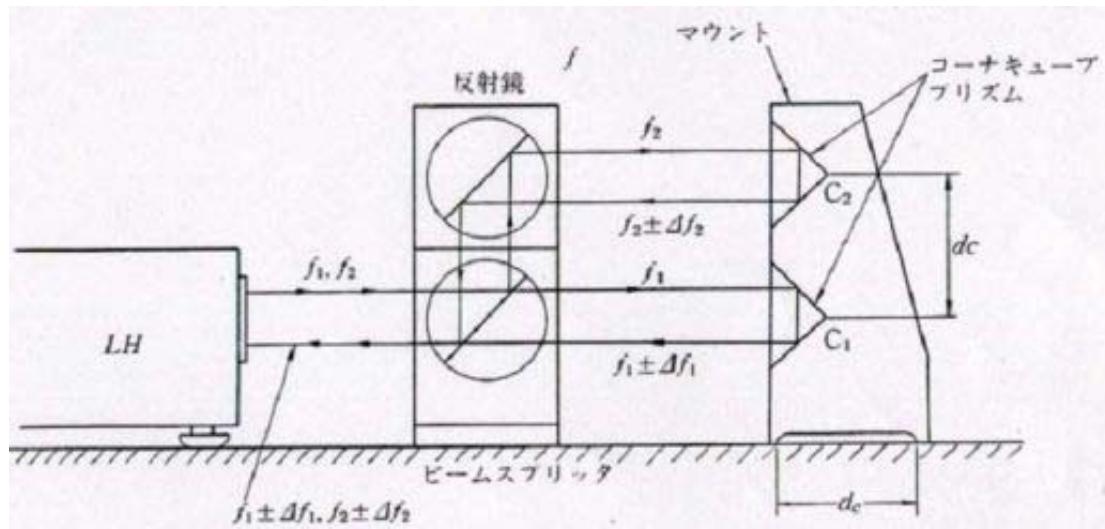
セレーション式
割り出し機構



一対の研削ラップ仕上げされたもの⁵

(f) レーザ干渉角度計

2波長安定レーザを光源に用いた角度計

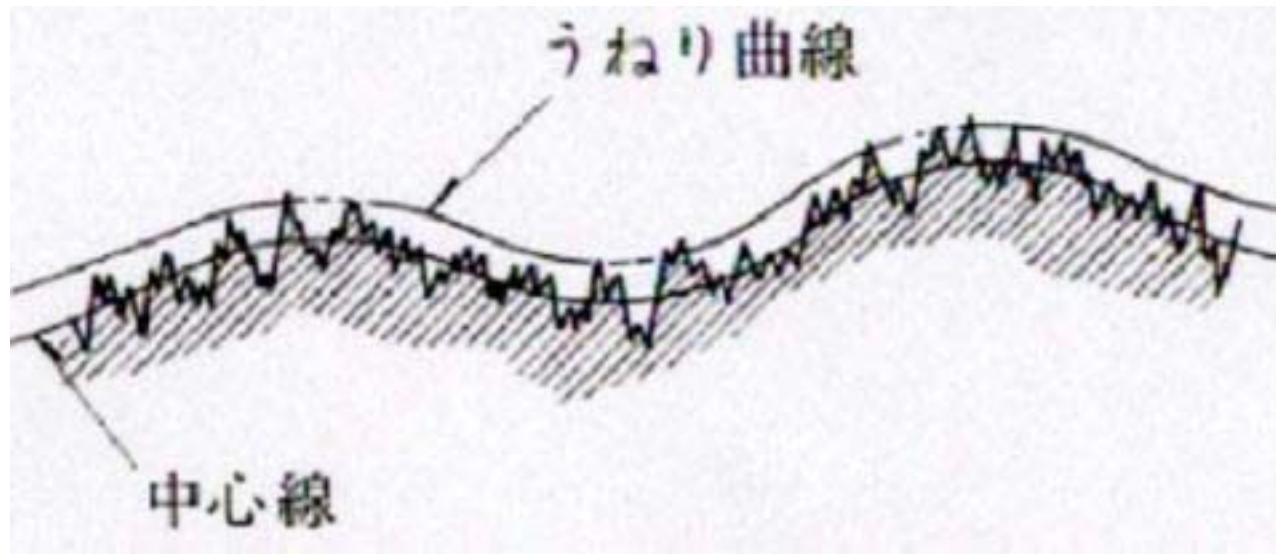


FUJINON干渉角度計 AI-1
(富士写真光機株式会社)

マウントが動いているとドップラー効果により周波数がそれぞれ変化する。
移動量の差はマウントの傾きに比例する。

2)表面粗さを測る

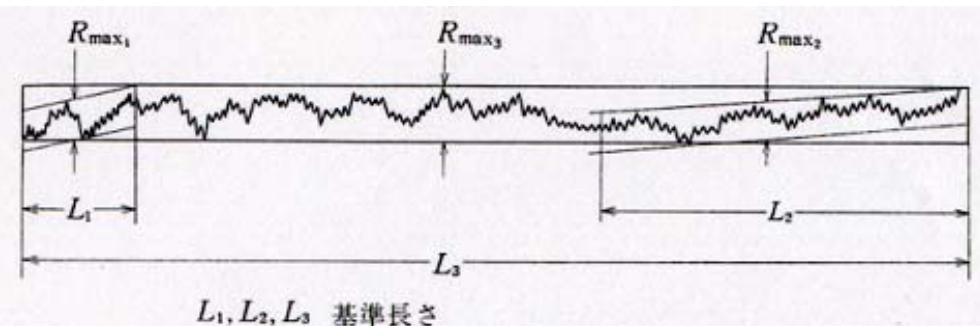
工作の仕上面の断面を拡大すれば凹凸が表れる。
これを断面曲線という。
この凹凸の程度を“表面粗さ”という。



表面粗さを数値で表す方法: JISB0601では

- ・最大高さ(R_{max})
- ・十点平均粗さ(R_s)
- ・中心線平均粗さ(R_a)

・最大高さ(Rmax)



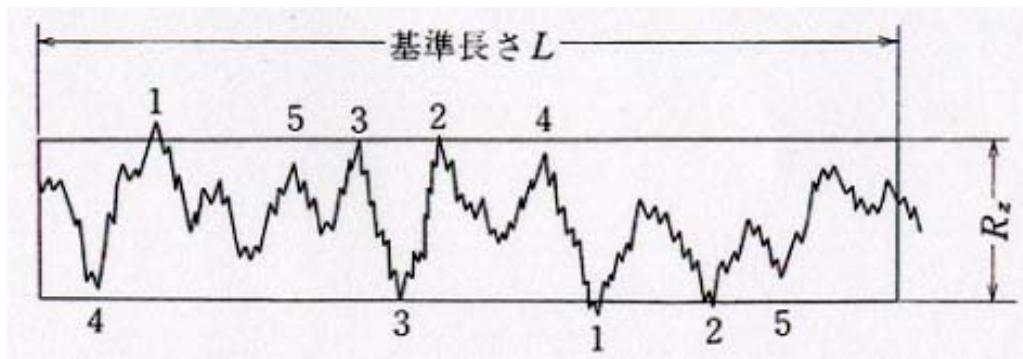
抜き取り部分の最大高さ

基準長さL:

0.08, 0.25, 0.8, 2.5, 8, 25mm

$8.5 \mu m$ Rmax, L=2.5mm

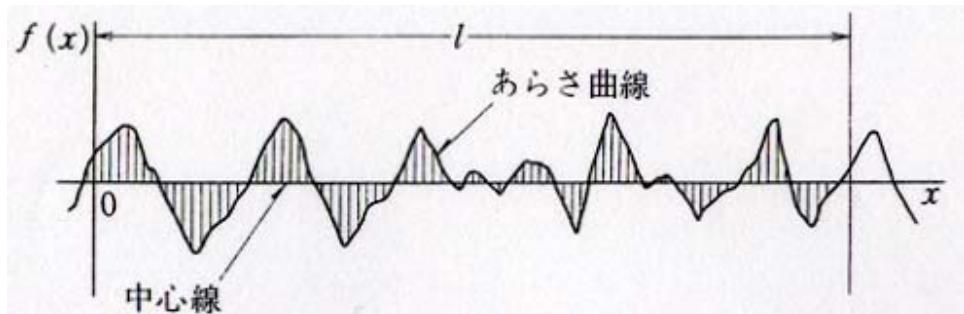
・十点平均粗さ(Rs)



抜き取り部分の十点平均あらさ

高いほうから3番目の山頂と深いほうから3番目の谷底を通る平均線に平行な2直線の距離を μm で表した。

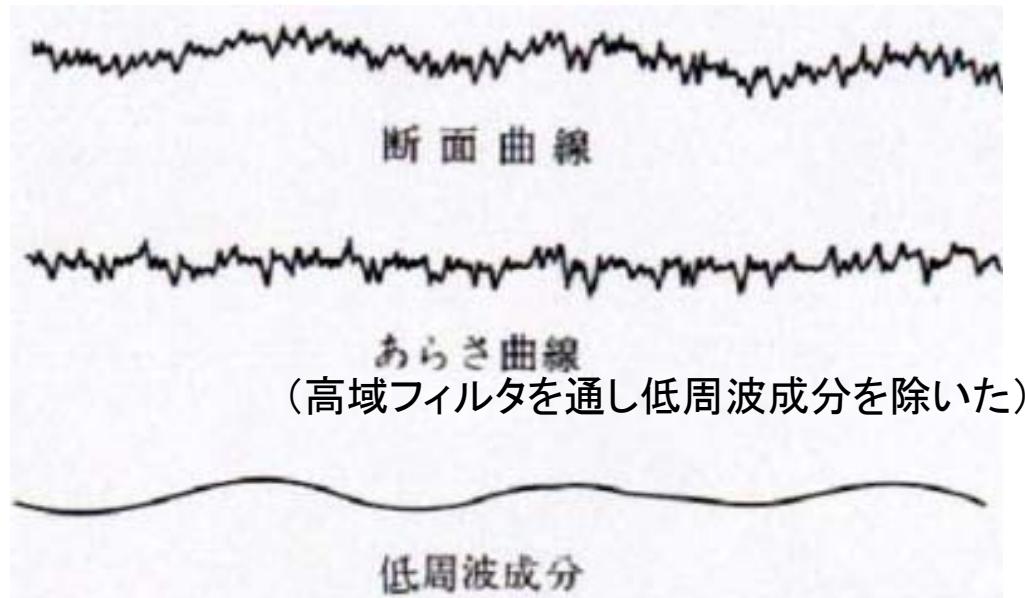
・中心線平均粗さ(Ra)



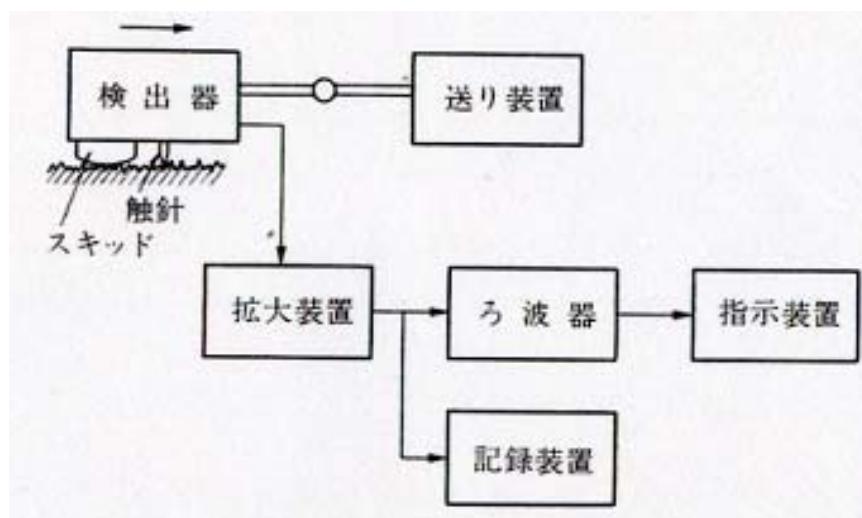
中心線平均あらさ

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx$$

断面曲線とあらさ曲線



触針式測定法



小形表面粗さ測定機
((株)ミツトヨ)

被測定物の表面上の触針を接触させて移動するとき、触針が面の凹凸にならって上下する。電気式測定器ではこの上下動を拡大して記録する。

5.2 質量と力を測る

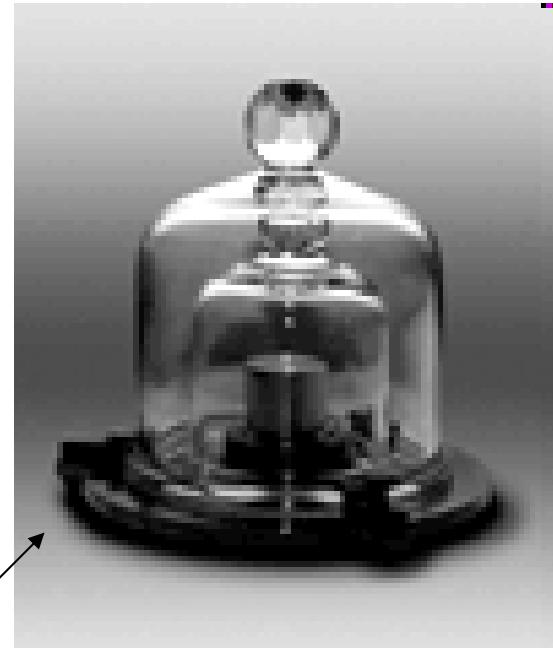
物体に働く力 F は質量 m と加速度 a で表される。

$$F = ma$$

質量の基準：国際キログラム原器
原器の質量を1キログラム(kg)と定義
力の単位 1ニュートン(N)

地球上の重力加速度 $g = \underline{9.80665\text{m/s}^2}$
(国際協定標準値)

1キログラム重量(kgf) : $1\text{kgf} = 9.80665\text{N}$



過去100年以上にわたり、
質量の基本単位はパリ郊外、国際度量衡局(BIPM)
の小さな研究室に保管さ
れている「国際キログラム
原器」によって定義されて
きた。白金とイリジウムの
合金で精密に作られた円
柱は高さと直径がともに
39mmで、国際単位系(SI)
によれば、この質量が「1キ
ログラム」の定義だ。¹⁰

5.3 速度と加速度を測る

1) 空間フィルタ

暗い部屋の中で格子戸越しに動いている物体を見ると、物体の移動する速度によって目の感じる明るさの変化の周波数が異なる。この原理を利用した速度センサである。

検出された出力波形の周期 T はくし形の受光部の1ピッチ間 p を点光源の像が移動する時間に等しい。

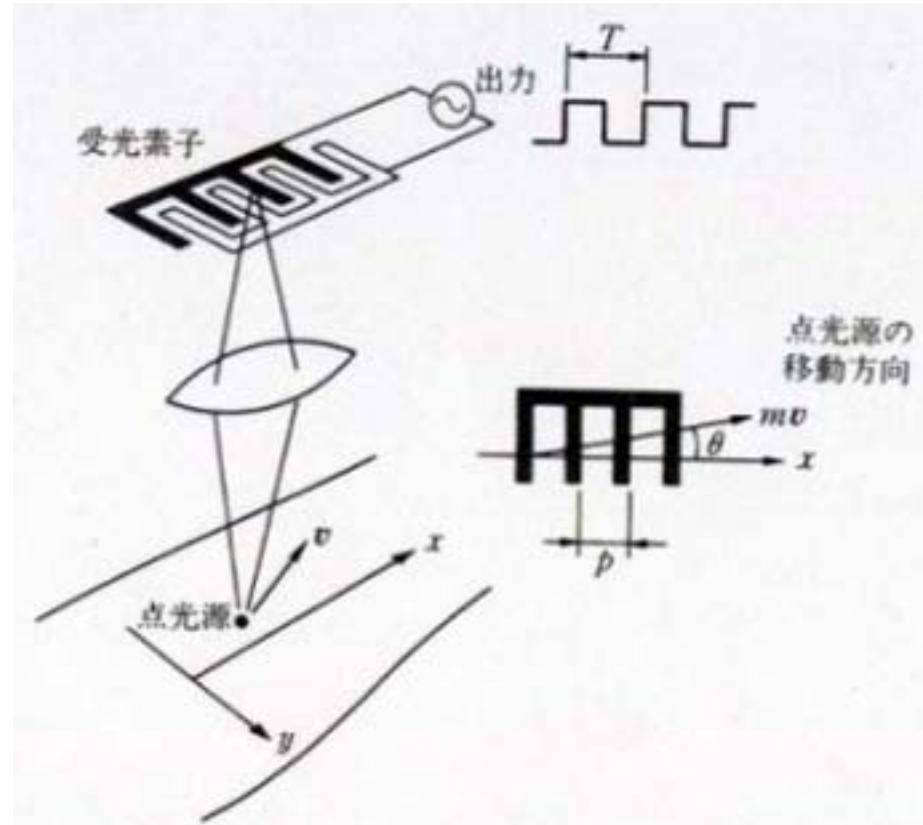
$$T = \frac{p}{mv \cos \theta}$$

m : 光学系の倍率

θ : 点光源移動方向と素子とのずれ角

受光素子に対する方向の点光源の速度:

$$v \cos \theta = \frac{pf}{m} \quad (f: \text{出力波形の周波数 } \frac{1}{T} \text{ (Hz)})$$



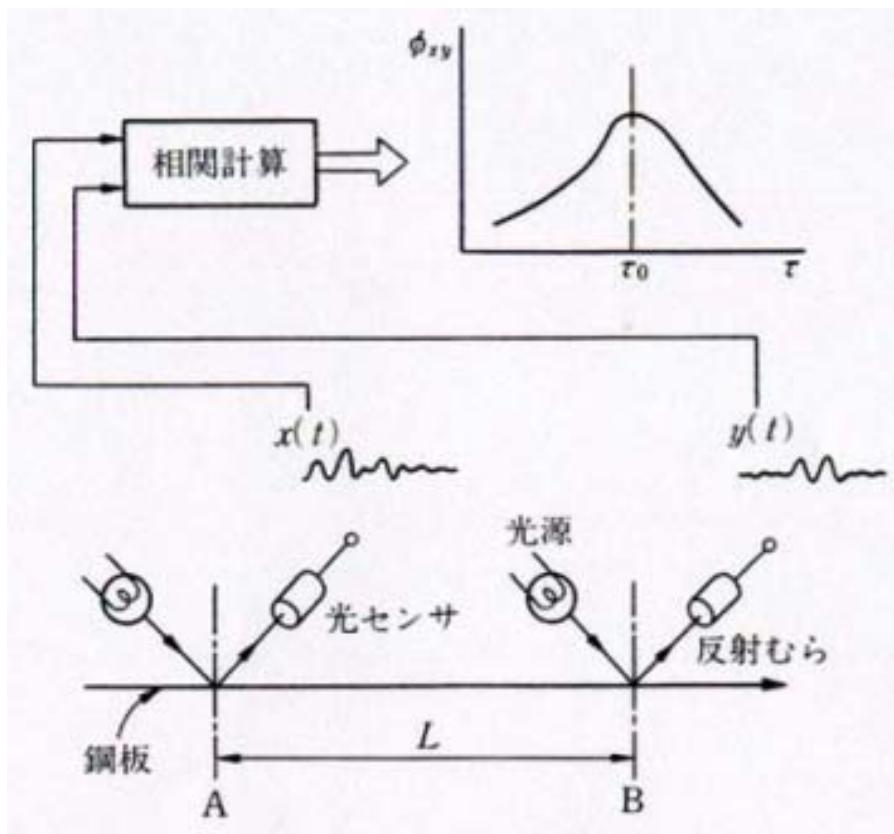
適用例:

- ・自動車の速度測定
- ・土石流、河川などの速度測定など

2)相関法による速度センサ

相関法は不規則な波形の移動時間を計算することにより速度を決める方法である。

例:鋼板の送り速度測定



距離 L 離れた2点に光源とフォトセンサの組み合わせを設置し、それぞれのセンサで鋼板表面からの反射むらを検出する。この鋼板むらは、A点($x(t)$)だけでなく移動時間 τ_0 だけ離れたB点($y(t)$)でも検出される。この2つの信号の相関を使って τ_0 を求める。

相互相関関数 $\phi_{xy}(\tau)$:

$$\begin{aligned}\phi_{xy}(\tau) &= \overline{x(t)y(t+\tau)} \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t+\tau)dt\end{aligned}$$

相関関数から求めた τ_0 から速度 v を求める。

$$v = \frac{L}{\tau_0}$$

3) ドップラー速度計

パトカー や 救急車 の サイレン が 自分 に 近づいてくるときは 高い 周波数 に 聞こえ、逆に 遠ざかるときは 低い 音 に 聴こえる 現象 が ドップラー効果 である。この 原理 を 利用 した 速度計 が ドップラー速度計 で、 速度 v の 運動 物体 に 発信 源 から 周波数 f_0 の 電波 や 音波 を 送信 し、運動 物体 から 反射 された 信号 を 観測 点 で 受信 し、周 波数 の 変化 (ドップラー周 波数 f_d) から 速度 を 求める。

受信 波 の 周 波数 f_r と すれど
ドップラー周 波数 f_d は 次 式 と なる。

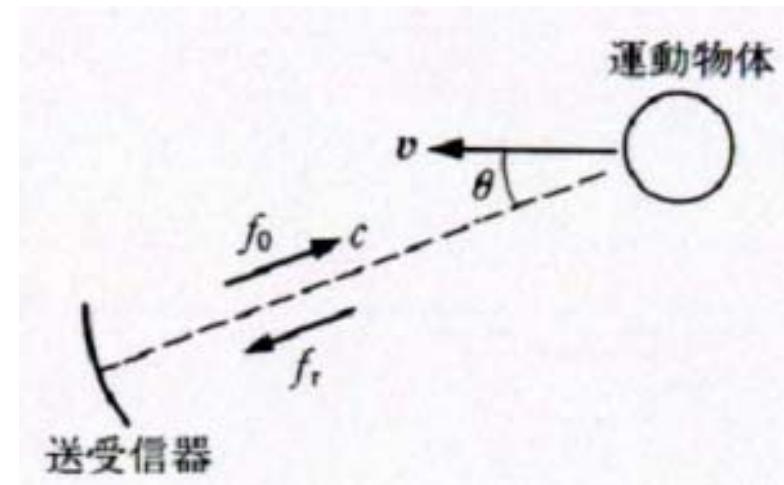
$$f_d = f_r - f_0 = 2f_0 \frac{v}{c} \cos \theta$$

c : 送信 波 の 速 度

θ : 運動 物体 の 進行 方向 と 送信 波 の 方向 との なす 角度

運動 物体 の 速 度 v :

$$v = \frac{cf_d}{2f_0 \cos \theta}$$



適用 例

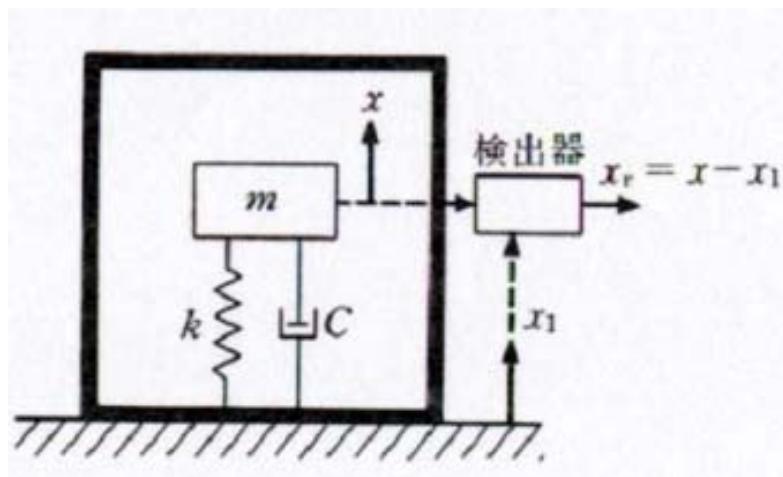
- ・ スピードガン
- ・ 竜巻 の 移動 速 度

など

4) 加速度センサ

加速度センサは対象物体に取り付けてその加速度を測定するセンサである。
ロボット、地震計、航空機・車両などの振動系など

サイズモ式ピックアップ



箱の中の質量をばねとダンパを介して
枠に取り付けた構造である。

質量の変位を x 、対象物体の変位を x_1
とすると、この系の運動方程式は次式
となる。

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{x}_1) + k(x - x_1) = 0$$

m : 質量, k : ばね定数,
 c : ダンパの粘性減衰係数

$$\ddot{x}_r + 2\xi\omega_n\dot{x}_r + \omega_n^2x_r = -\alpha_1$$



$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

ω_n : 固有周波数, ξ : 減衰比, α_1 : x_1 の加速度

α_1 を入力, x_r を出力とし伝達関数G(s)を求める。

$$G(s) = \frac{-1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

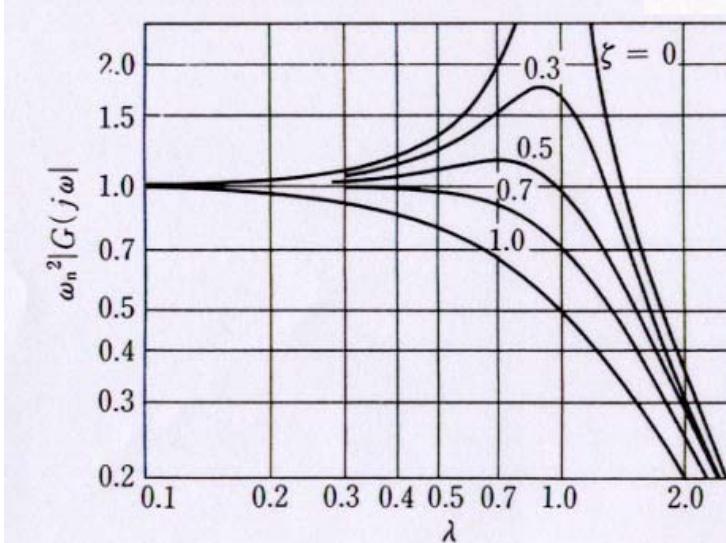
$s=j\omega$ とおき周波数伝達関数に変換する。

$$G(j\omega) = \frac{-(1/\omega_n)^2}{1 - \lambda^2 + j2\zeta\lambda}$$

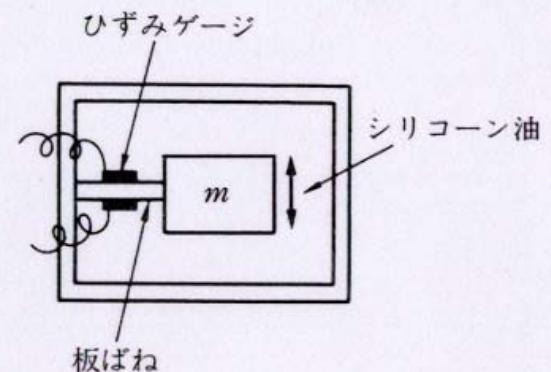
(ゲイン) $|G(j\omega)| = \left| \frac{x_r}{\alpha_1} \right| = \frac{(1/\omega_n)^2}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$

$\lambda (= \omega / \omega_n)$: 振動数比

(位相) $\varphi = - \tan^{-1} \frac{2\zeta\lambda}{1 - \lambda^2} - 180^\circ$



ひずみゲージによる実際の検出器



5.4 力とトルクを測る

材料の物理性質を示す定数: 弾性係数、ヤング率、ポアソン比

長さLの棒状(線状)試料に軸方向に引っ張り(圧縮)力Fを加えたときの伸び(縮み)を ΔL とすると、応力 σ とひずみ ε (S:断面積)は

$$\sigma = F/S, \quad \varepsilon = \Delta L/L$$

また、 σ と ε の間に次式が成り立っている

$$\sigma = E \varepsilon$$

ただし、Eはヤング率(Pa)である。ヤング率は縦弾性係数、あるいは伸び弾性係数とも呼ばれている。

一定太さの棒材に軸方向に引っ張り力Fを加えたとき、軸方向に伸びると同時に横方向に縮みが起きる。横方向のひずみを $\Delta D/D$ (D直径)として、ポアソン比は次のように定義される

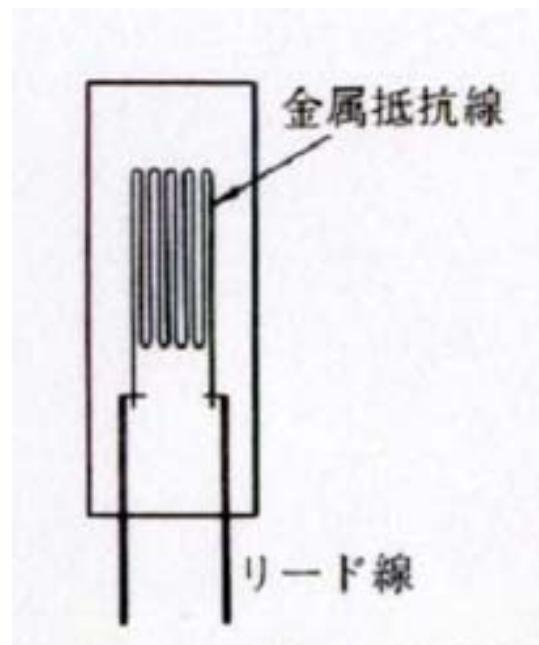
$$\nu = \frac{\Delta D / D}{\Delta L / L} \quad \text{また} \quad \frac{\Delta D}{D} = \frac{\nu}{E} \frac{F}{S}$$

最近のロボットは溶接などの作業において手先の位置だけでなく力の制御も行っている。そのため、力やトルクの測定が必要となる。

1)ひずみゲージ

導体がひずみを受けると抵抗が変化することを利用したセンサである。

非常に細い金属抵抗線を薄い紙またはエポキシ樹脂などの薄片上に接着したもののが一般的である。



$$\text{導体の抵抗 } R (\Omega) : R = \frac{\rho l}{A} \quad \begin{array}{l} l: \text{長さ} \\ A: \text{断面積} \\ \rho: \text{抵抗率} \end{array}$$

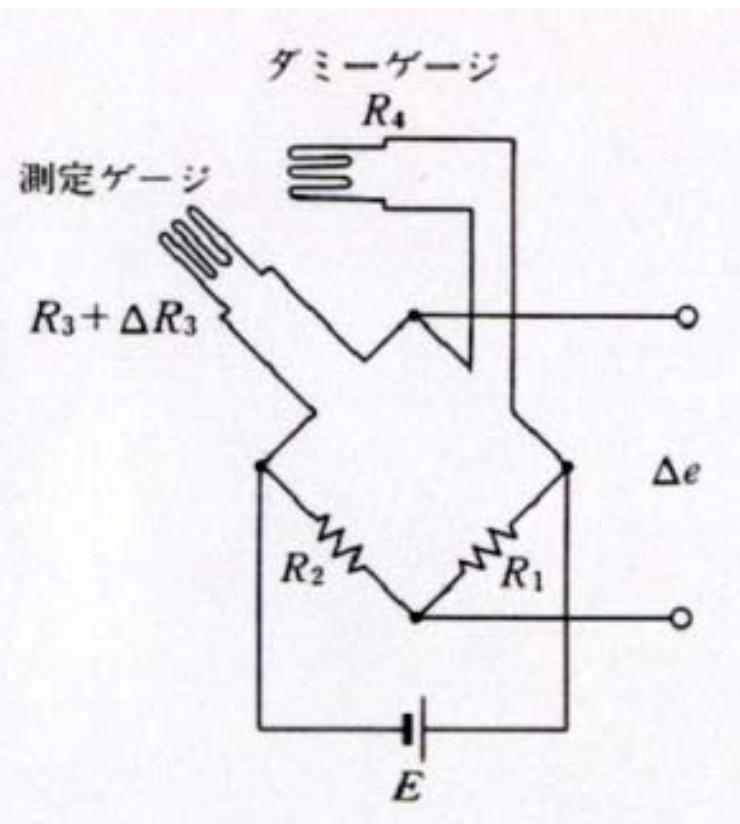
$$\text{抵抗の変化率} : \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}$$

$$\varepsilon = \Delta l / l \text{ とおく。}$$

$$\text{ゲージ率 } K : K = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon}$$

$$\nu : \text{ポアソン比 } \Delta A / A = -2\nu\varepsilon$$

ブリッジ測定回路



抵抗の微小変化に対する電圧の
微小変化 Δe :

$$\Delta e = \frac{a}{(1+a)^2} \left[\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right) - \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} \right) + \left(\frac{\Delta R_3}{R_3} \right) - \left(\frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \right] E$$

$$a = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4}$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

として、 R_3 を測定用ゲージとすると

$$\Delta R_3 = \Delta R, \quad \Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_4 = 0$$

$$\Delta e = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) E = \frac{1}{4} K \varepsilon E$$

ひずみ ε に比例する出力電圧が得られる。

温度補償

ひずみゲージは温度の変化に対しても抵抗値が変化するため温度補償が必要となる。

ひずみによる抵抗変化と温度による抵抗変化の式：

$$\Delta e = \frac{a}{(1+a)^2} \left\{ \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right)_T - \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} \right)_T + \left(\frac{\Delta R_3}{R_3} \right)_T + \left(\frac{\Delta R_3}{R_3} \right)_\varepsilon - \left(\frac{\Delta R_4}{R_4} \right)_T \right\} E$$

添字 ε , T はひずみと温度を表す。

$$R_1 = R_2 = R \quad (\text{温度による抵抗変化率は相殺})$$

$$\Delta e = \frac{a}{(1+a)^2} \left\{ \left(\frac{\Delta R_3}{R_3} \right)_T + \left(\frac{\Delta R_3}{R_3} \right)_\varepsilon - \left(\frac{\Delta R_4}{R_4} \right)_T \right\} E$$

R_4 をダミーゲージとして測定ゲージの近くにもってくる場合

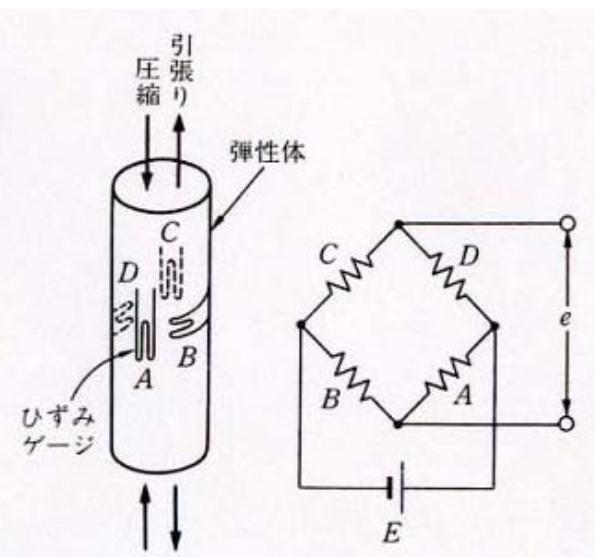
$$R_3 = R_4 = R \quad (\text{温度による抵抗変化率は同じ})$$

$$\Delta e = \frac{a}{(1+a)^2} \left\{ \left(\frac{\Delta R}{R_3} \right)_\varepsilon \right\} E = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) E$$

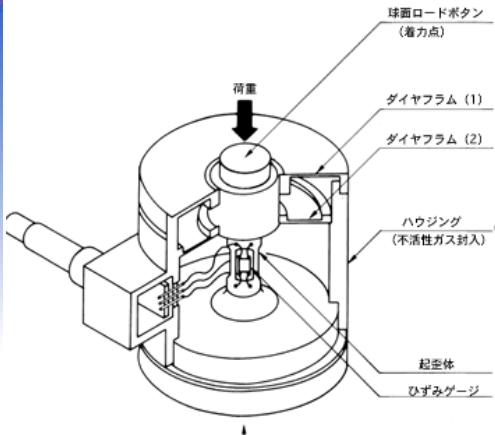
2) ロードセル(荷重計)

ひずみゲージを力センサとして用いるためには、弾性体の表面にひずみゲージを接着して、弾性体に加わる力によるひずみを測定することから求める。

4つのひずみゲージを弾性体にはり付け、抵抗の変化をホイートストンブリッジにより測定する。



$$\text{荷重 } W(\text{N}) : W = \sigma S = \epsilon E_s S = \frac{2E_s S}{K(1 + \nu_R)} \frac{\Delta e}{E}$$



縦方向のひずみはA, Cのゲージの抵抗変化率

$$\left(\frac{\Delta R_A}{R_A} \right)_\epsilon = \left(\frac{\Delta R_C}{R_C} \right)_\epsilon = \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_\epsilon$$

横方向のひずみはB, Dのゲージの抵抗変化率

$$\left(\frac{\Delta R_B}{R_B} \right)_\epsilon = \left(\frac{\Delta R_D}{R_D} \right)_\epsilon = -\nu_R \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_\epsilon$$

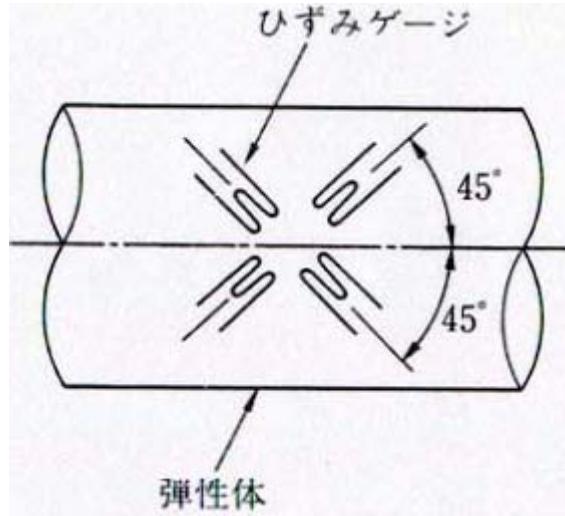
ν_R : 弹性体のボアソン比

出力電圧
の変化

$$\begin{aligned} \Delta e &= \frac{1}{4} \left\{ 2 \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_\epsilon + 2\nu_R \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_\epsilon \right\} E \\ &= \frac{1}{2} (1 + \nu_R) \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_\epsilon E \\ &= \frac{1}{2} K \epsilon (1 + \nu_R) E \end{aligned}$$

σ : 弹性体の応力
 E_s : ヤング率
 S : 断面積

3)トルク



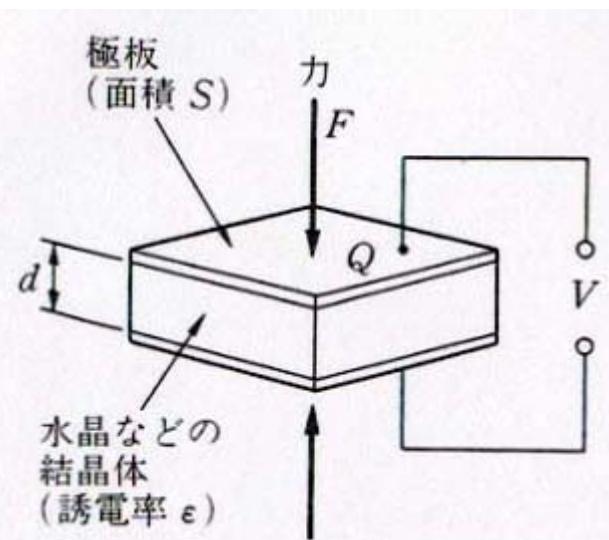
ひずみゲージを用いてトルクを測る。弾性体の棒のねじりをひずみゲージで測定する。

ねじれ角 θ とトルク T の関係:

$$\theta = \frac{32L}{\pi d^4 G} T$$

L : 棒の長さ
 d : 棒の半径
 G : 横弾性係数

4)電圧素子



結晶体(水晶, チタン酸バリウム, ロシェル塩など)に特定の方向から力を加えて変形されると表面に電荷を発生する(圧電効果あるいはピエゾ電気効果)。

コンデンサの端子電圧 V :

$$V = \delta \frac{d}{\epsilon S} F = gd \frac{F}{S}$$

δ : 圧電率, ϵ : 誘電率, $g = \delta / \epsilon$: 電圧感度²¹

5) 馬力(動力)の測り方

馬力すなわち動力(仕事率)は単位時間当たりのエネルギーである。

SI単位: $J/s = W$ (ワット)

(従来の工学単位のPS(仏馬力: 1PS=735.5W)
は現在も自動車などに使われている。)

一般に回転機械の動力 P (W)はトルク T (N・m)
と回転数(回転速度) n を測定し次式で求める。

動力計

・吸収動力計

動力吸収部で回転機械の動力を吸収し、そのトルク反力を動力吸収部から伸びた腕に受けて天秤で測定する。

$$\text{トルク } T = FL$$

・伝達動力計

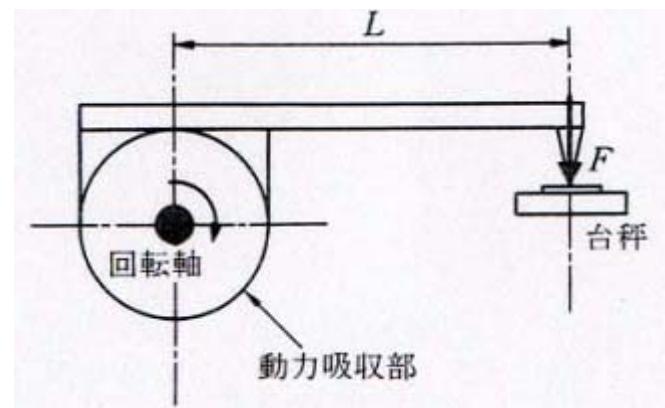
原動機と作業機の間の伝達軸のねじれからトルクを測定するものである。



渦電流式電気動力計

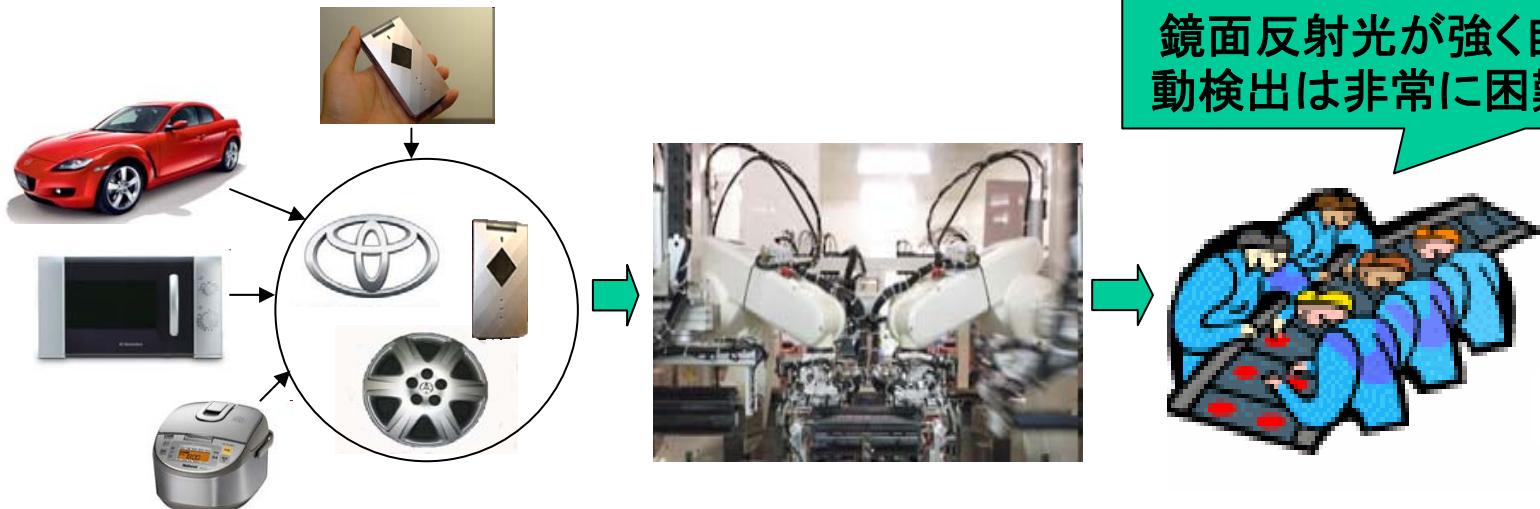
$$P = 2\pi Tn/60$$

吸収動力計の原理



- 例:
- ・木製のブレーキによる摩擦
 - ・水中を回転する回転円板による水の抵抗
 - ・磁場中での導体の回転円板による渦電流発生とともに抗力
- など

金属鏡面部品等の表面欠陥



車や家電製品などに金属
メッキ部品が多く使われる

これらの部品は自動生産
ラインで製造されている

製品の表面検査は殆ど
目視で行い、コスト高い

自然照明での金属表面画像の例



(a)欠陥なし



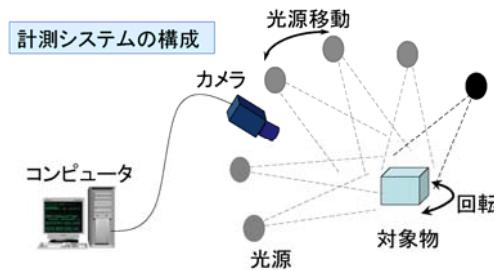
(b)欠陥あり

特徴

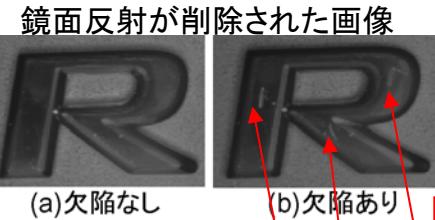
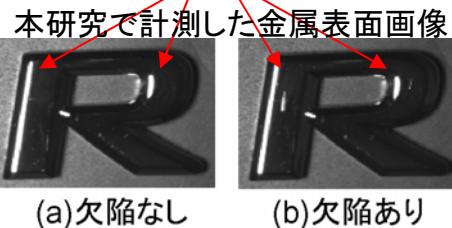
- ・鏡のような表面で物が写りやすい
- ・鏡面反射が強く欠陥検出しにくい
- ・自動化は非常に困難

新技術の概要

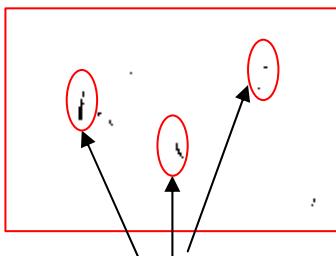
画像計測



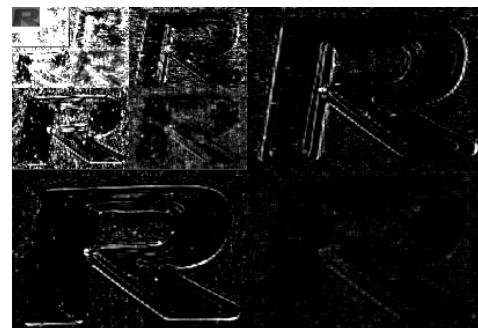
表面反射モデルにより鏡面反射光を削除



微小欠陥



欠陥検出
(パターンマッチングなどによる)



CDWTによりノイズ除去、欠陥鮮鋭化
(微小な傷でも検出できる)

検査の流れ

画像計測



鏡面反射を削除



ノイズ除去、欠陥鮮鋭化など



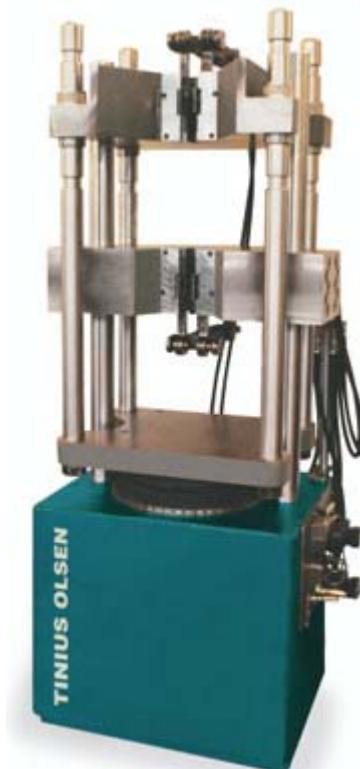
欠陥検出



欠陥検出にはテンプレートマッチングを用いる。

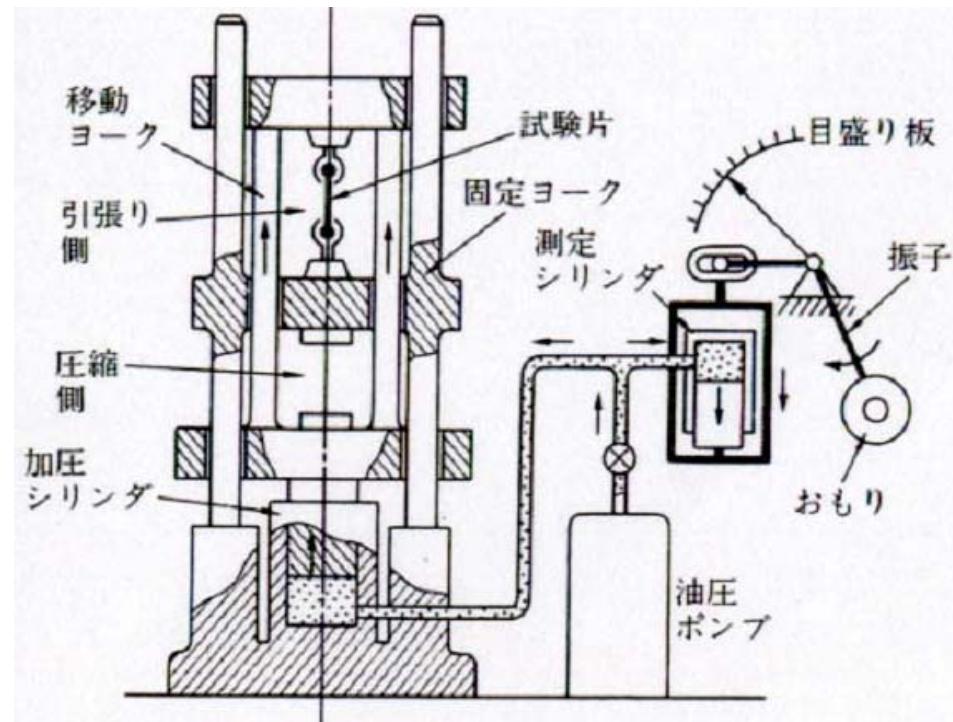
5.5 強さと硬さを測る

材料を使ってモノづくりをするとき、材料の力学的強度の検討が必要で、材料の強度データをもとに構造力学設計がなされる。マクロ的な材料強度データを得るために基礎計測が材料試験である。



油圧式万能試験機オープンフロントスープル
ユニテスト(株)

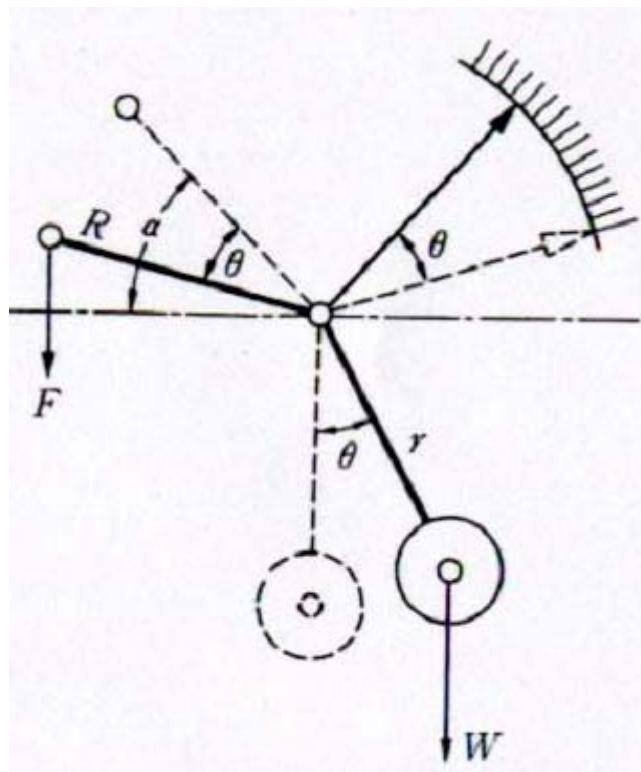
万能試験機の構造例



1) 引張り・圧縮試験

引っ張りおよび圧縮試験は材料の力学特性を知るうえで、最も基本的なものである。静的荷重を用いた万能試験機は油圧ポンプの働きによって加圧シリンダに加圧し、固定ヨークに対し移動ヨークが上方向に移動することにより、引っ張りあるいは圧縮荷重を一軸方向に与える。

重力変換器の原理



加えられる力F:

$$F = \frac{Wr}{R} \frac{\sin\theta}{\cos(\alpha - \theta)}$$

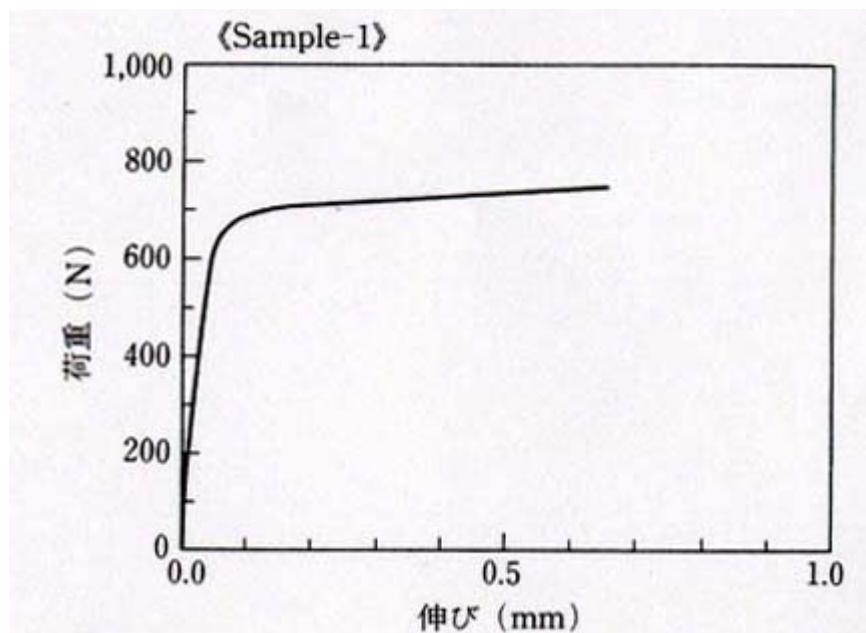
この原理は古くから力の測定に用いられてきたもので、振子式皿秤といわれている。

応力－ひずみ曲線

$$\text{応力 } \sigma = \frac{\text{荷重 (N)}}{\text{試験片原断面積 (m}^2)} \text{ (Pa)}$$

$$\text{ひずみ } \epsilon = \frac{\text{伸びまたは縮み (m)}}{\text{試験片のとの長さ (m)}}$$

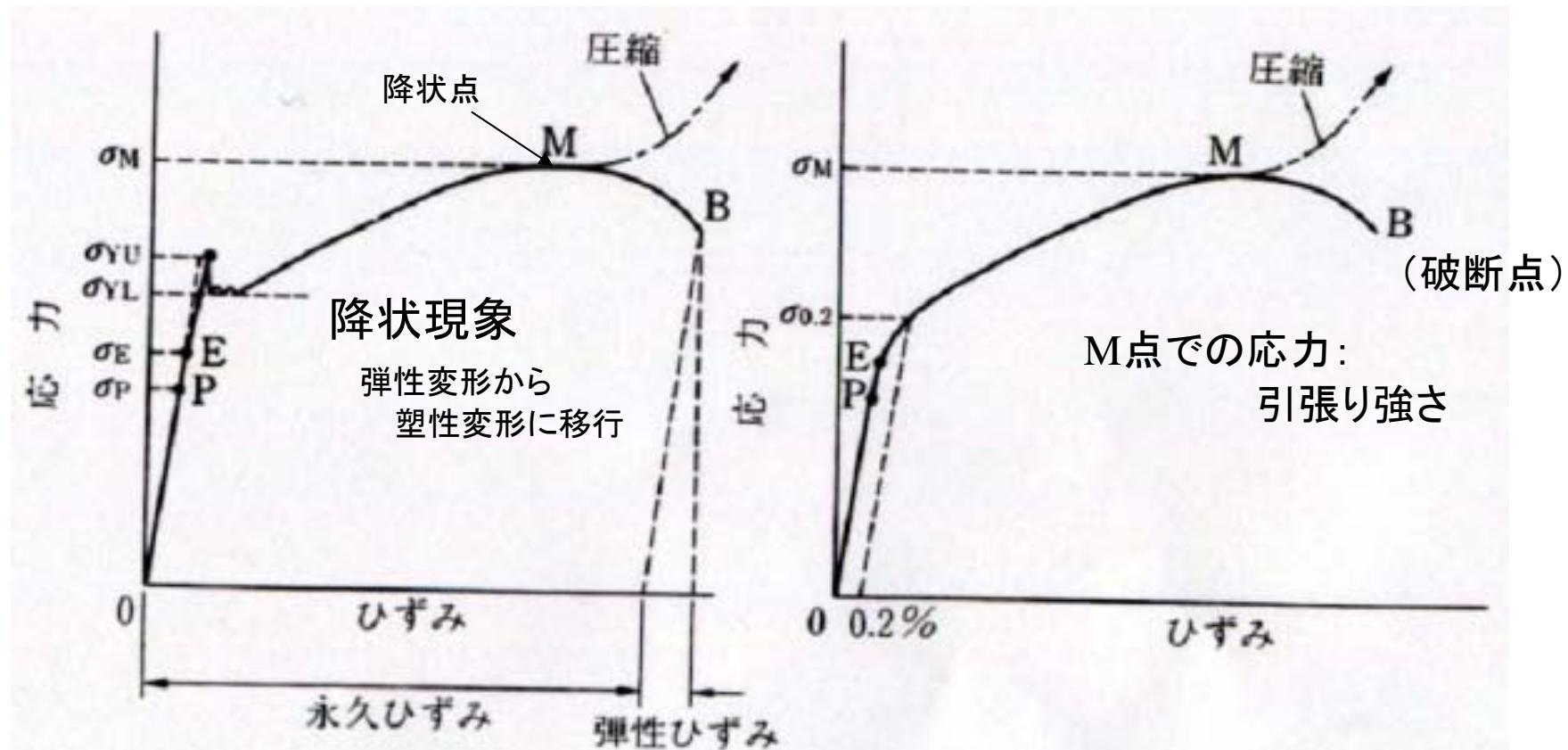
荷重－伸び曲線



軟鋼とアルミニウムの引張り応力-ひずみ曲線

軟鋼の応力-ひずみ曲線

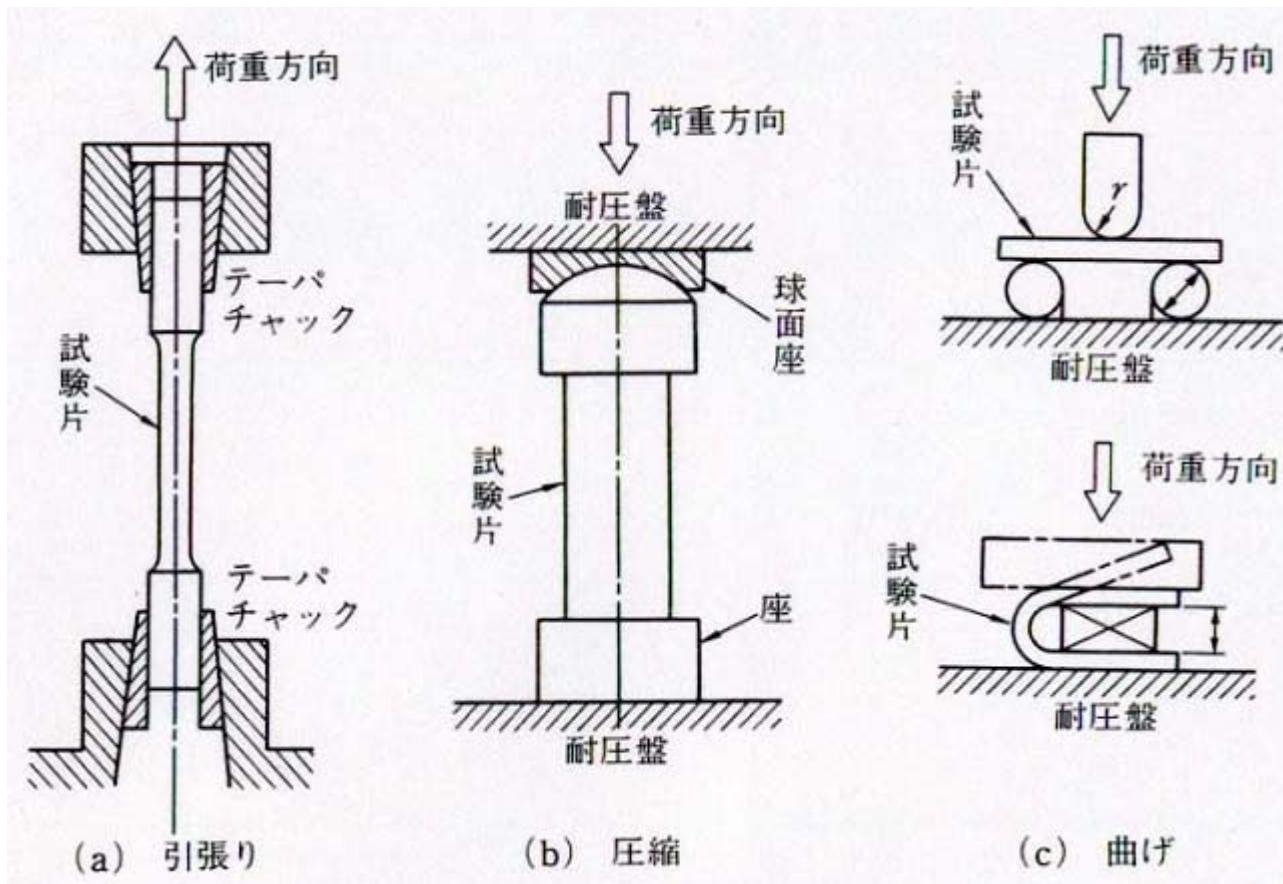
アルミニウムの応力-ひずみ曲線



OE間は弾性変形領域であり、Eを弾性限界といふ。弾性限界内では負荷を除くと試験片の寸法は元に戻る。応力-ひずみ曲線が直線から外れた点が比例限界Pであり、OP間ではフックの法則($F=K\Delta L$)が成り立つ。

圧縮試験はコンクリートなど非金属材料について多く行われるが金属では鉄などで行われる場合がある。

万能試験機の試験片の概形と加力状態



試験片の形状はJIS規格により厳密に定められている。

身近な材料についての力学的特性の例

材料	引っ張り強さ (MPa)	圧縮強さ (MPa)	降伏点あるいは 0.2%耐力 (MPa)	綫弾性係数 (GPa)
炭素鋼	330～1,300	350～450	200～400	200～220
鋳鉄	120～240	500～1,000	—	80～150
アルミニウム	100～350	—	80～220	70～75
ポリカーボネート	55～66	80～90	—	2.0～2.4
コンクリート	4～12	60～300	—	—

2)衝撃試験

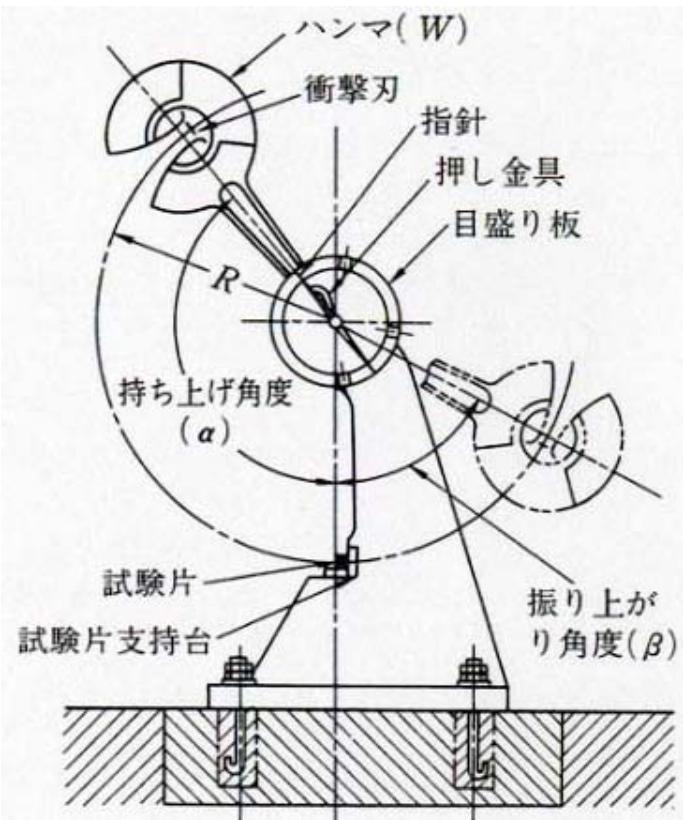
鉄鋼などの金属材料の多くは熱処理の違いによって耐衝撃性に大きな差が生じる。材料の粘り(じん性)やもろさ(ぜい性)は静的試験のみから必ずしも推定できず、直接的な衝撃試験によって求められる。

試験片をハンマで叩き割るために必要なエネルギーを求める。



振子型衝撃試験機

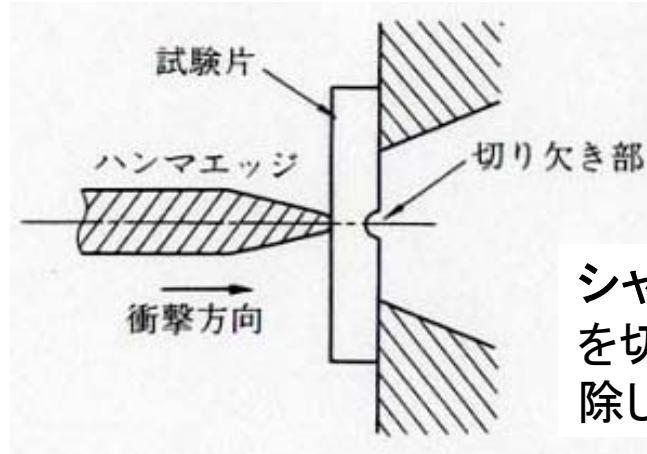
シャルピー衝撃試験機



破壊に使ったエネルギー E :

$$E = WR (\cos \beta - \cos \alpha) - L \text{ (J)}$$

W :ハンマの重量, R :ハンマの打撃中心と回転中心の間の距離,
 L :空気抵抗や摩擦抵抗によるエネルギー損失(空振りから求める。)



試験片の断面:
10 × 10mm

シャルピー衝撃値は E を切り欠け部の面積で除したもので表される。

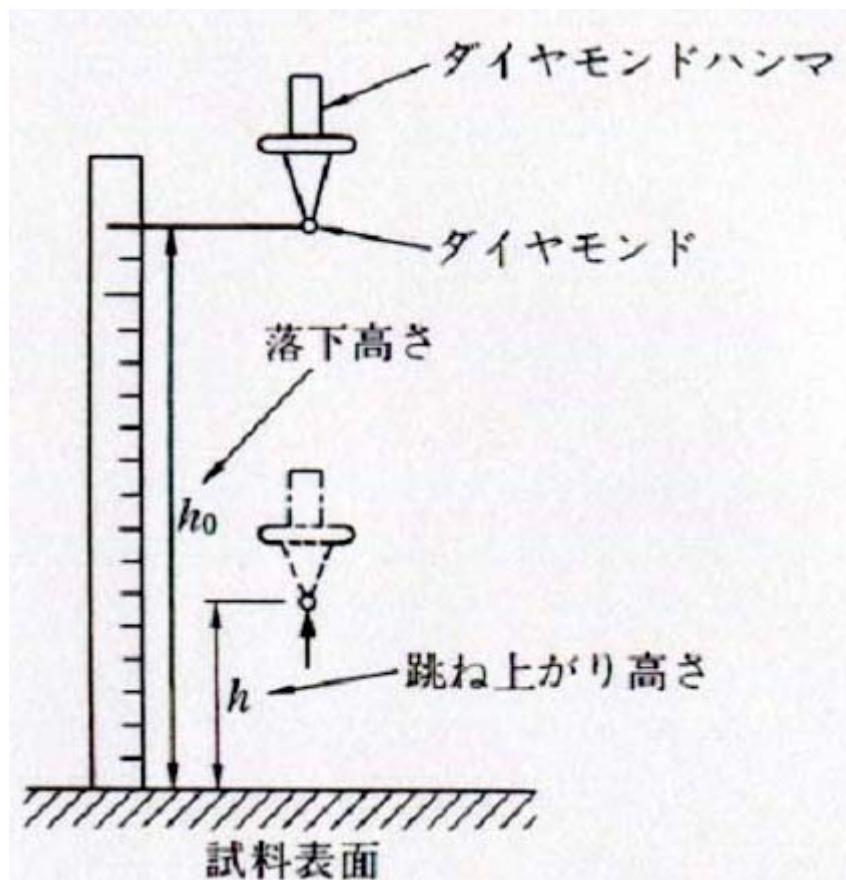
動的な荷重一変位曲線が求められる自動化
シャルピー試験機:ハンマ部に抵抗線ひずみゲージ, ハンマ角度を角度センサを使う。

3) 硬さ試験

(a) 反発型(衝撃荷重式)

シェア硬さと呼ばれており、原理は一定の形状を持つダイヤモンドを一定の高さから試験面に垂直に落下させ、その跳ね上がりの高さを計測する。その計測された値からシェア硬さを求める。

シェア硬度計の原理



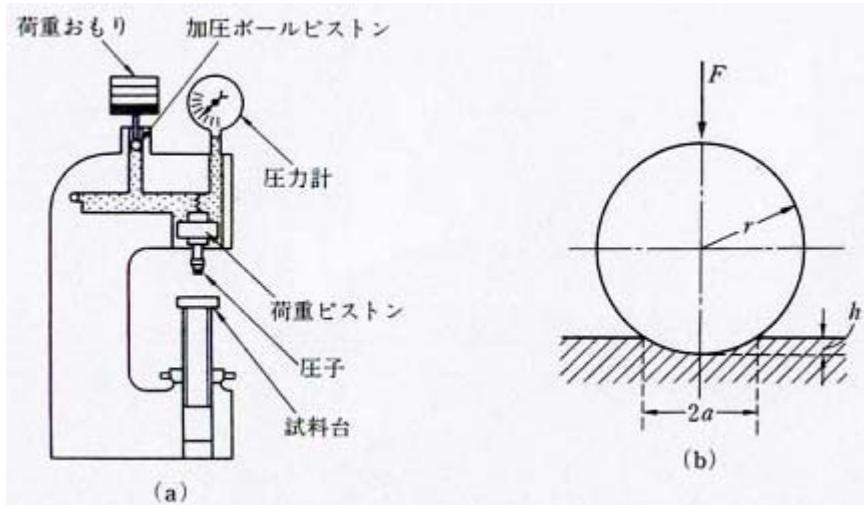
例えば

ハンマ重量 $2.31 \times 10^{-2} \text{ N}$, 先端半球ダイヤモンドチップ半径 10^{-3} m , 落下高さ 0.254 m のとき, シェア硬さ HS は次式となる。

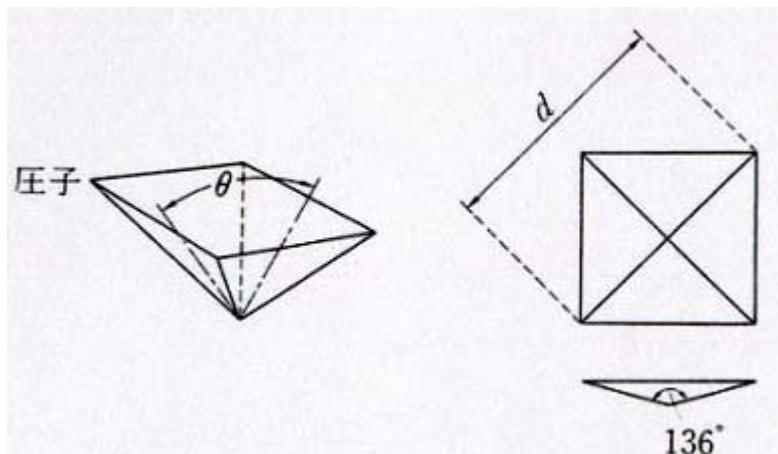
$$HS = (10^4 / 65) \times (h / h_0)$$

(b)押し込み型(静荷重式)

(I)ブリネル硬さ試験



(II)ビッカース硬さ試験



半径 r の鋼あるいは超合金の球形圧子を荷重 $F(N)$ で試験片に押し込む。このときの接触球面部の面積 S は次式となる。

$$S = 2\pi rh \quad h = r - \sqrt{r^2 - a^2}$$

接触球面の平均圧力 F/S によるブシネル硬さHB:

$$HB = 0.102 \times \frac{F}{S} = \frac{0.102F}{2\pi r(r - \sqrt{r^2 - a^2})}$$

(0.102はNからkgfへの換算係数)

対面角 θ が136°の正四角錐のダイアモンド圧子を荷重 F で試験片に押し込む。荷重 F を塑性変形くぼみの対角線の長さ d から求めた表面積 S で除した F/S を硬度HVとする。

$$HV = 0.102 \times \frac{F}{S} = 0.102 \times \frac{2F \sin \theta / 2}{d^2}$$

5. 表面と力学的量の測定

5.1 表面を測る

1)角度を測る、2)表面粗さを測る

5.2 質量と力を測る

5.3 速度と加速度を測る

1)空間フィルタ、2)相関法による速度センサ、
3)ドップラー速度計、4)加速度センサ

5.4 力とトルクを測る

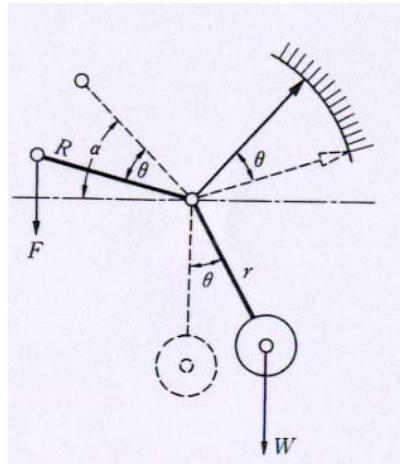
1)ひずみゲージ、2)ロードセル(荷重計)、3)トルク、
4)電圧素子、5)馬力(動力)の測り方

5.5 強さと硬さを測る

1)引っ張り・圧縮試験、2)衝撃試験、3)硬さ試験

演習問題V:

1) 重力変換機の原理を説明し、加えられる力Fを求めよ。



2) 次の常微分方程式を解け。ただし、 m は質量、 g は重力加速度、 k は抵抗の係数とする。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = mg - k \frac{dx}{dt}$$

3) ロードセルの原理を説明せよ