

授業スケジュール

<第1回(4/12)> ガイダンス、電気・電子計測の学び方

<第2回(4/19)> 計測の基礎

<第3回(4/26)> 電気計測・直流1

<第4回(5/10)> 電気計測・直流2

<第5回(5/17)> 電気計測・交流1

<第6回(5/24)> 電気計測・交流2

<第7回(5/31)> センサの基礎1

<第8回(6/7)> センサの基礎2

<第9回(6/14)> 中間試験

<第10回(6/21)> センサによる計測技術1

<第11回(6/28)> センサによる計測技術2

<第12回(7/5)> アナログ・デジタル変換(計測値の変換)

<第13回(7/12)> デジタル計測制御システムの基礎

<第14回(7/19)> 電子計測器

<第15回> 定期試験(定期試験期間で実施)

電気・電子計測

【第11回】センサによる計測技術2
第6章センサによる物理量の計測(2)

<http://cobayasi.com/keisoku/11th/11th.pdf>

今日の学習の要点

(テキストP65～P74)

今日の授業では、機械制御で必要とされる力学量を検出するための**圧力,位置,加速度,速度の計測用センサ**について、**構成原理や利用方法**について学び、目的に応じた変位を検知する素子の組み合わせによって、**力学量を計測**する。

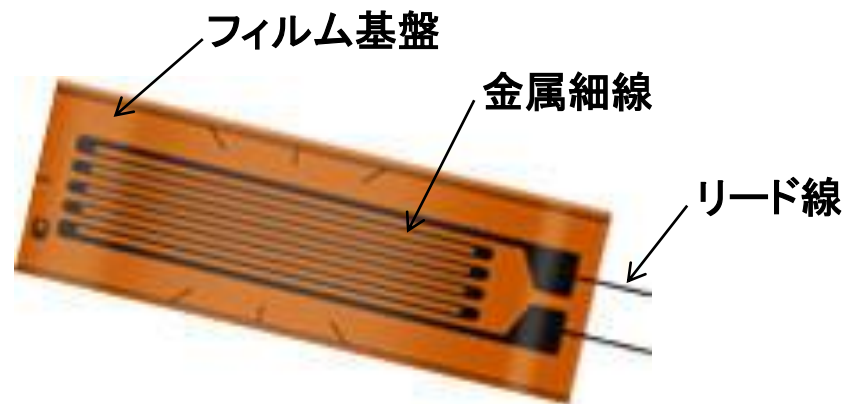
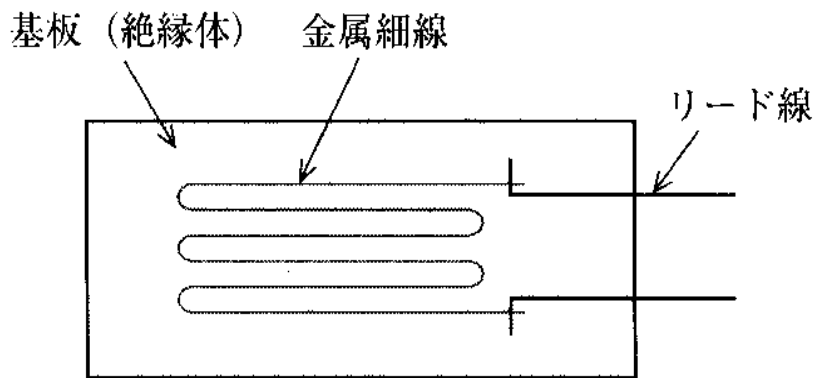
1. 圧力を計測しよう
2. 位置を計測しよう
3. 加速度を計測しよう
4. 速度を計測しよう

1. 圧力を計測しよう 教科書P65-67

(1) ひずみゲージ(ストレインゲージ)

金属材料は、固有の抵抗値があるので、外部からの力(圧縮力や引張力など)によって、抵抗値が変化する。この性質を利用して、ひずみゲージは、**力によって生じた金属抵抗値の変化を計測**することができる。

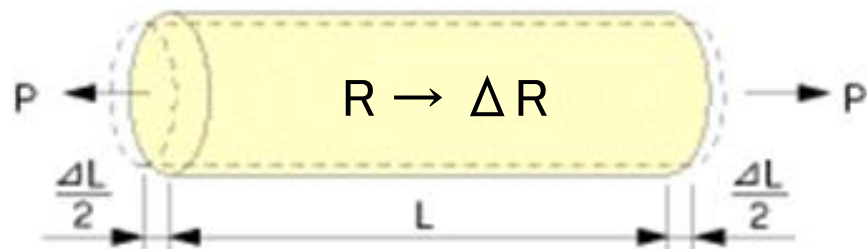
構造は、細線状の金属(または半導体)の抵抗線を、ベースとなる絶縁体の基板の上に張り付けた構造である。



● 図6・1 金属線ひずみゲージ ●
教科書P65

株式会社共和電業社製 ひずみゲージ概観

● ひずみゲージの原理



構造体にひずみがかわると、ひずみゲージの抵抗線が伸び縮みして、電気抵抗が変化する。ひずみと電気抵抗の関係は、式(6・1)の通り。

$$\frac{\Delta R}{R} = G \frac{\Delta L}{L} \quad (6 \cdot 1)$$

$R[\Omega]$: 電気抵抗

$\Delta R[\Omega]$: ひずみによって生じた電気抵抗の変化分

$L[m]$: 抵抗線の長さ

$\Delta L[m]$: ひずみによって生じた抵抗線の長さ

G (ゲージ率): 抵抗線の材質によって決まる係数(金属: 2~4, 半導体: 20~400)

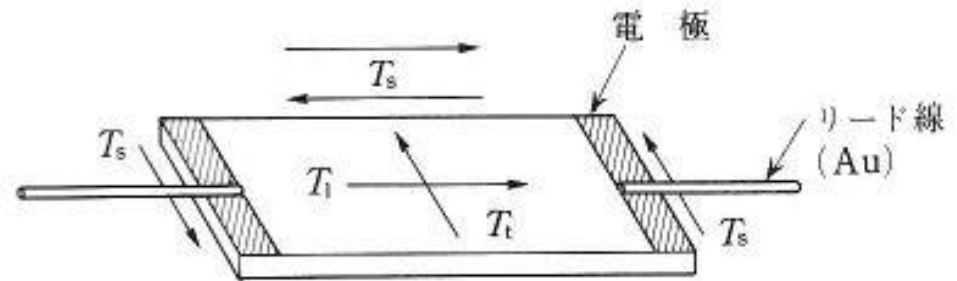
抵抗線に半導体 (Si など) の材料を使った、**半導体ピエゾ抵抗効果** (ひずみによって抵抗率 ρ (ロー) が変化する) **形ひずみゲージ** のひずみと電気抵抗の関係は、式 (6・2) の通り。

$$\frac{\Delta R}{R} \cong \gamma y \frac{\Delta L}{L} \quad (6 \cdot 2)$$

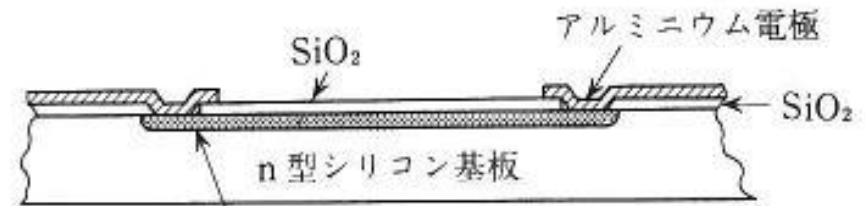
γ : ピエゾ抵抗係数
 y : ヤング率
 γy : ゲージ率 G

別名: (縦) 弾性係数
 (縦方向の) ひずみ e と
 応力 σ の係数 $\gamma = \sigma / e$

ピエゾ抵抗効果によって
 変化した抵抗値 R の変化
 分 ΔR の割合 (半導体の種
 類によって変わる)



(a) バルクひずみゲージ

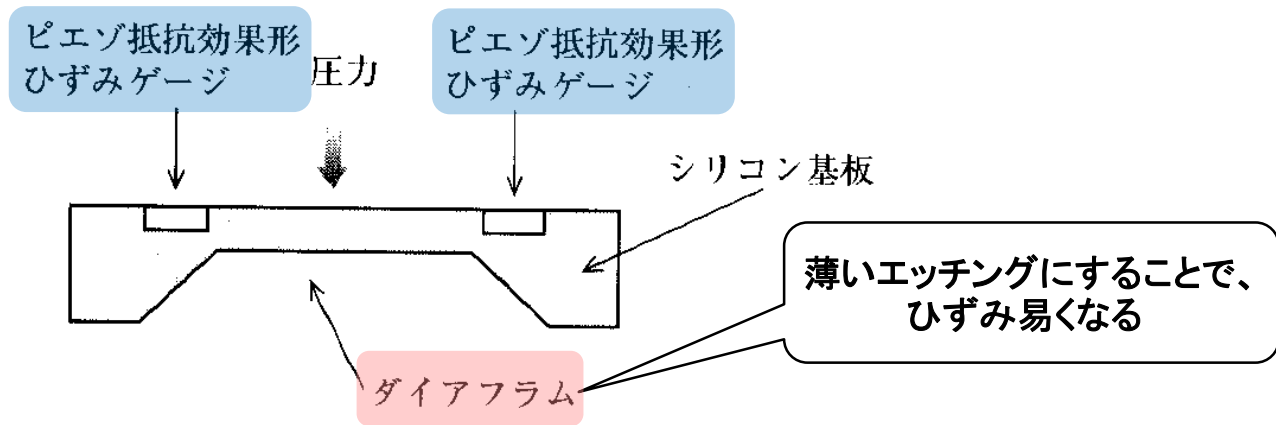


p 型ひずみゲージ

(b) 拡散型ひずみゲージ

(2) 半導体圧力センサ

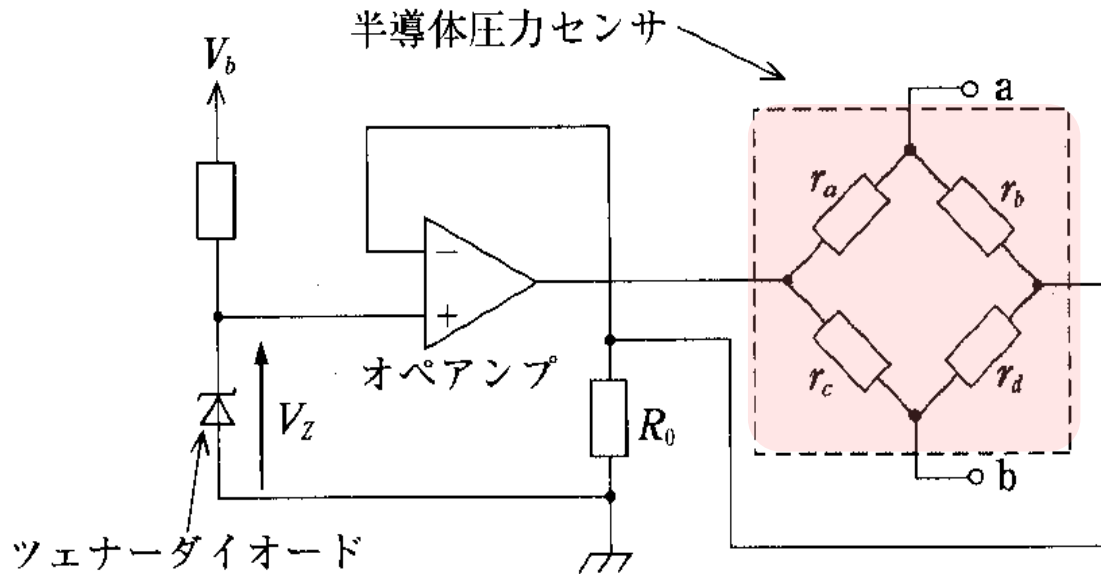
半導体のウェハ（シリコン基板）の裏面をひずみやすい隔膜（**ダイアフラム**）にし、表面に**ピエゾ抵抗効果形ひずみゲージ**を付けた構造の圧力センサ



● 図 6・2 半導体圧力センサの基本構成 ● 教科書P66

表面にある4つのひずみゲージは、圧力によってダイアフラムが伸縮し、抵抗値が変化する。この変化を、(次のスライドに示すような)ブリッジ回路で電圧として検出する。

● 半導体圧力センサを使った測定回路



● 図 6・3 半導体圧力センサ回路 ● 教科書P67

ツェナーダイオードの両端に発生した電圧 V_Z によって、抵抗 R_0 に一定の電流を流し、半導体圧力センサのブリッジ回路を平衡状態にする。

半導体センサに圧力を加えると、ブリッジ回路の平衡状態がくずれ、端子aの電位が増加し、端子bの電位が減少する。従って、端子a-b間の電圧を測定することで、圧力を知ることができる。

端子a-b間の電圧は微弱のため、一般的には、差動増幅回路を使って増幅する。

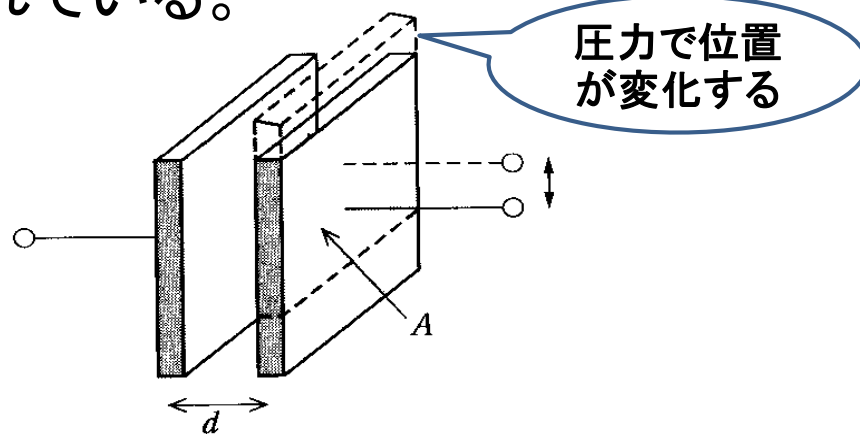
(3) 静電容量形圧力センサ

測定する圧力を静電容量の変化として計測する。

(平行平板)コンデンサの静電容量 C は、電極の面積 A と電極の距離 d とすると、式(6・3)で表される。ここで、 ε は誘電率(誘電体固有の係数)

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (6 \cdot 3)$$

シリコン半導体のダイヤフラムに圧力を与えて、ひずみによるダイヤフラムの位置の変化を、電圧として取り出す、可変容量形圧力センサがよく使用されている。



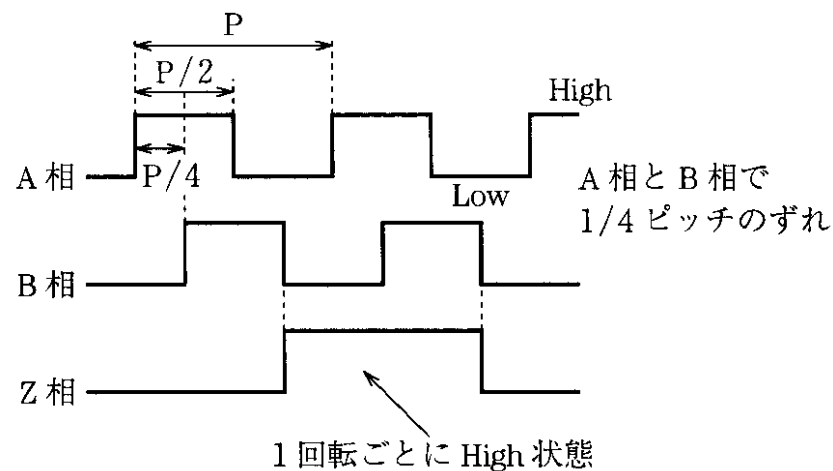
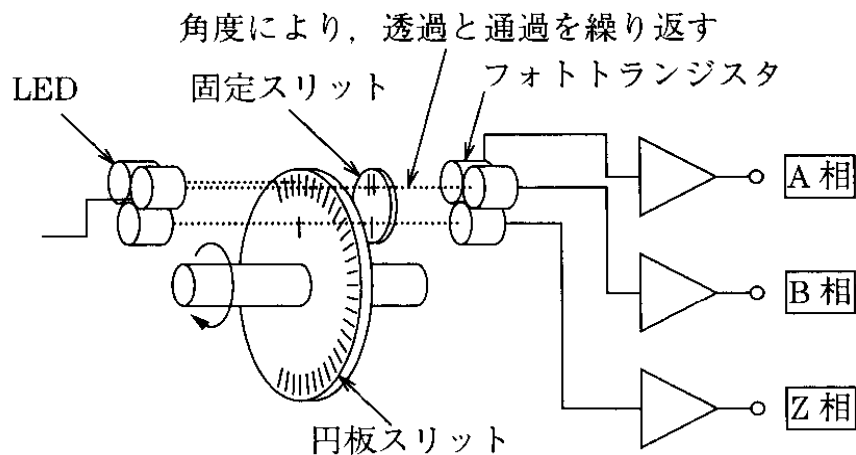
2. 位置を計測しよう 教科書P68-69

(1) ロータリエンコーダー(rotary encoder)

回転的な変位(回転角度、回転数、回転方向)を測定することができる

<インクリメンタル形>

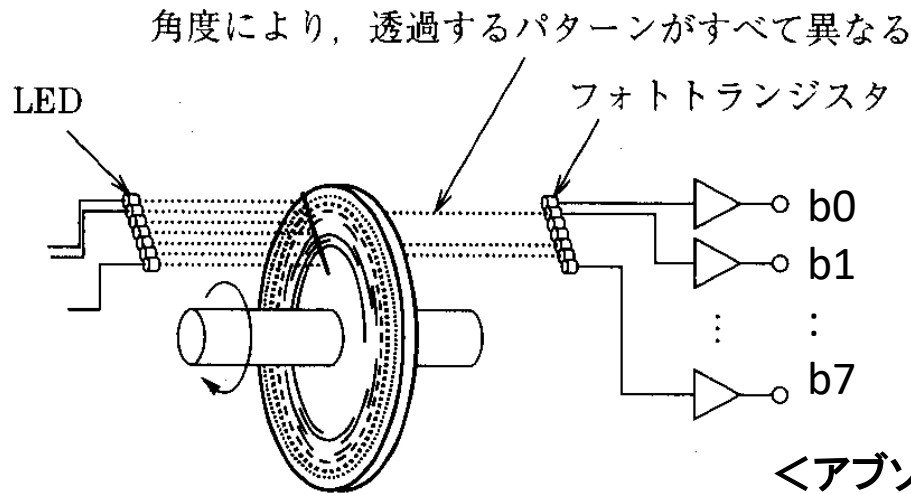
- 回転角に対応した連続パルスを出力する
- 連続パルスのパルス数をカウントすることで、回転角を測定できる
- A相とB相の位相の違いによって、回転方向(正回転、逆回転)を知ることができる



<インクリメンタル形ロータリエンコーダーの構成 と 出力信号>

<アブソリュート形>

- 回転偏位に対応した2進数のコードを出力する
- 絶対的な回転角度(基準位置からの角度)を測定できる



<アブソリュート形ロータリエンコーダーの出力コード>

<アブソリュート形ロータリエンコーダーの構成>

基準位置 →

回転角度 (度)	b7	..	b1	b0
0	0	..	0	0
1.4	0	..	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
360	1	..	1	1

(2) 差動トランス

可動鉄心の周りに巻いた1次コイルと2次コイルのトランスによって、ロッド(被測定物に固定された誘導棒)に取り付けた被測定物の直線的な変位を検出する

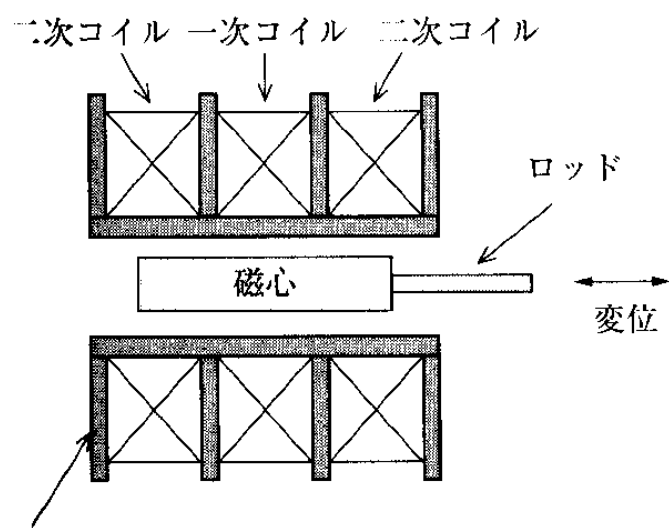


図6-7 差動トランスの構造 教科書P69

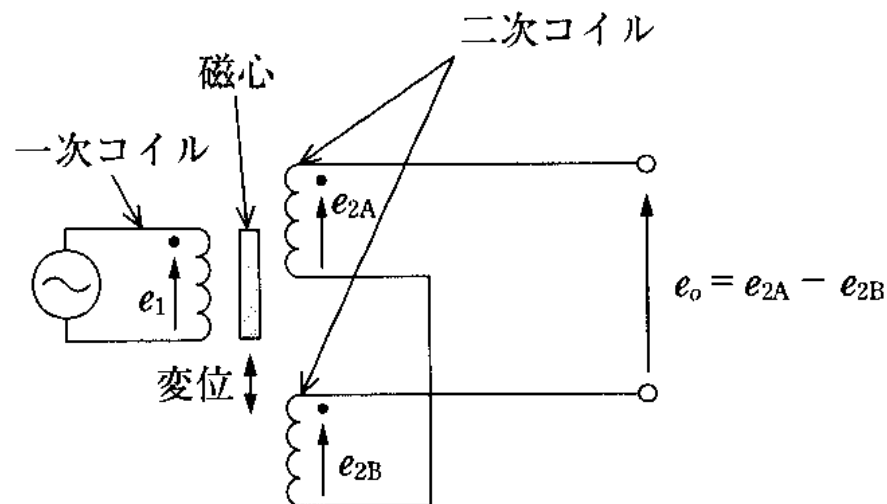


図6-8 差動トランスの結線 教科書P69

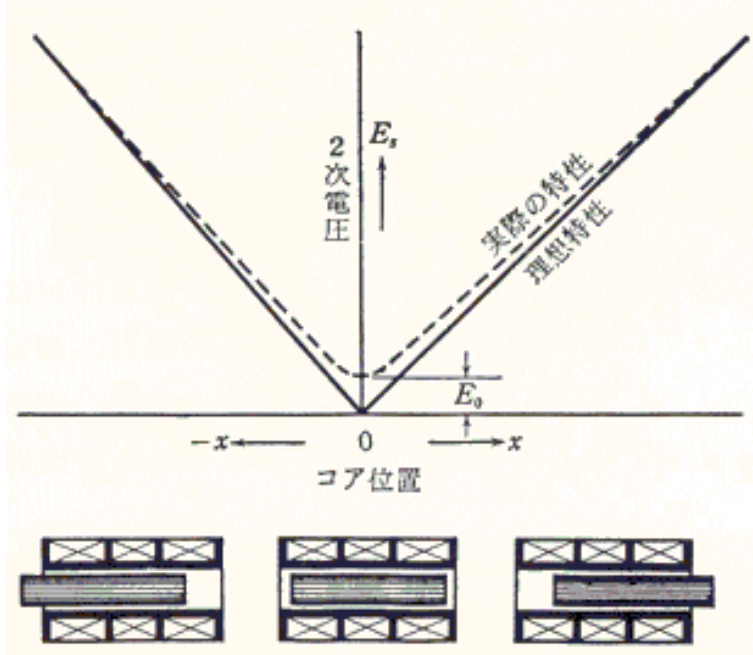
1次コイルに一定周波数の電圧 e_1 を与えると、被測定物が変位することによりロッドを介して磁心(可動鉄心)が変位する。このことにより、2次コイルに電圧 e_{2A} 及び e_{2B} が誘起されて、出力端子には電圧差 $e_0 = e_{2A} - e_{2B}$ が現れる。

可動鉄心が左右対称の位置(中央に位置)している時は、左右に誘起される交流電圧は等しくなり、電圧差が0となり出力は0となる。

可動鉄心の位置が中央からずれると、左右コイルの誘起電圧に差が生じ、その差に比例した交流電圧が現れる。

この交流電圧を1次コイルに流した交流電圧とくらべると可動鉄心が右にある場合と左にある場合とでは波形(位相)が逆になる。

この現象を利用して可動鉄心の左右の変位の大きさを正負の直流電圧の大きさに変換し、可動鉄心の変位を測定している。



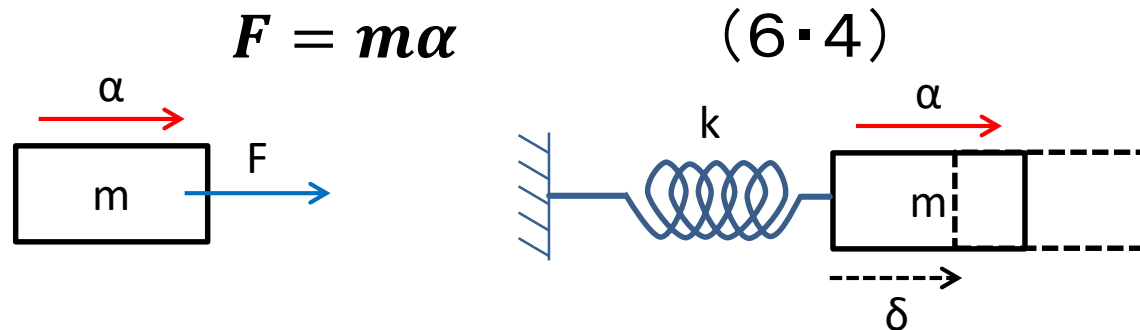
可動鉄心(コア)と2次コイルの出力電圧 e_0 (このグラフでは E_s)の関係

3. 加速度を計測しよう

教科書P70-71

< 加速度の計測原理 >

質量 m の物体に加速度 α が加わると、物体に働く力は式(6・4)の通りになる



物体をバネ係数 k のバネで支持すると、物体の変位(移動量) δ と加速度 α の関係は、式(6・5)の通りになる

$$m\alpha = k\delta \quad (6 \cdot 5)$$

式(6・4)と式(6・5)から、加速度 α の式(6・6)を導き出すことができる

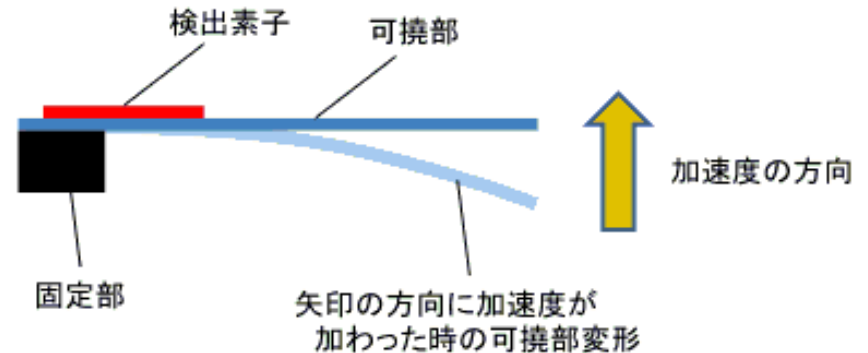
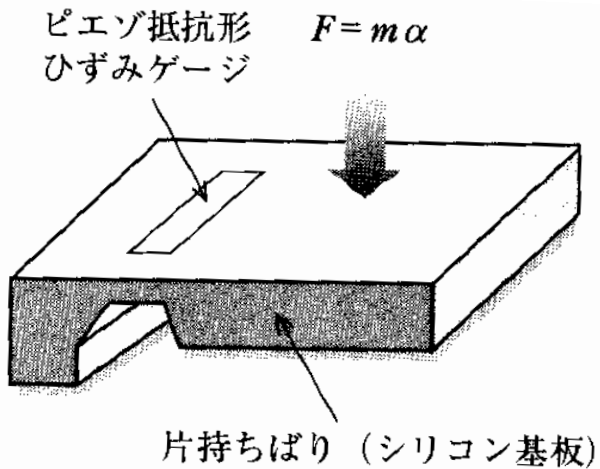
$$\alpha = \frac{k\delta}{m} \quad (6 \cdot 6)$$

従って、加速度 α は、変位 δ に比例する

(1) ピエゾ抵抗形加速度センサ

シリコン基板を加工して、一方を固定した片持ちばり(片側が持ち上がっている形態のはり)の根元にピエゾ抵抗形ひずみゲージを配置したセンサ

片持ちばりに力Fが加わると、はりの根元の変位量に応じて、ひずみゲージ抵抗値が変化する。この抵抗値の変化量から加速度を知ることができる



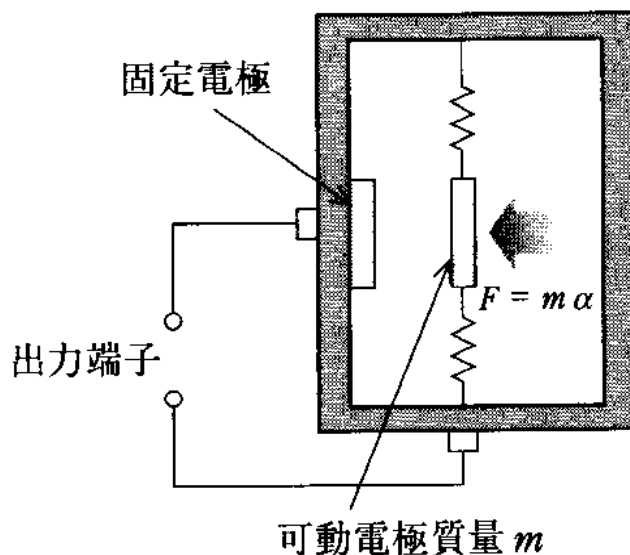
● 図 6・10 ピエゾ抵抗形加速度センサ ●
教科書P71

(2) 容量変化形加速度センサ

2つの電極の間に生じる静電容量が、加速度によって変化するような構造のセンサ

静電容量 C の変化量 ΔC は、固定電極と可動電極間の距離 d の変化量 Δd に比例するので、この距離を、加速度で変化するような構造にする

実際は、シリコン基板上に固定電極と可動電極をパターンで作成し、センサを小型化している



● 図 6・11 容量変化形加速度センサ ●
教科書P71

4. 速度を計測しよう

教科書P71-73

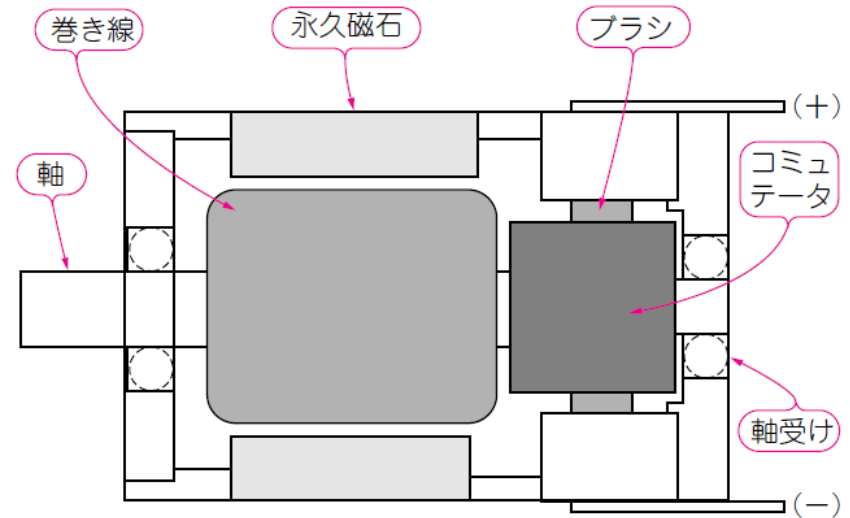
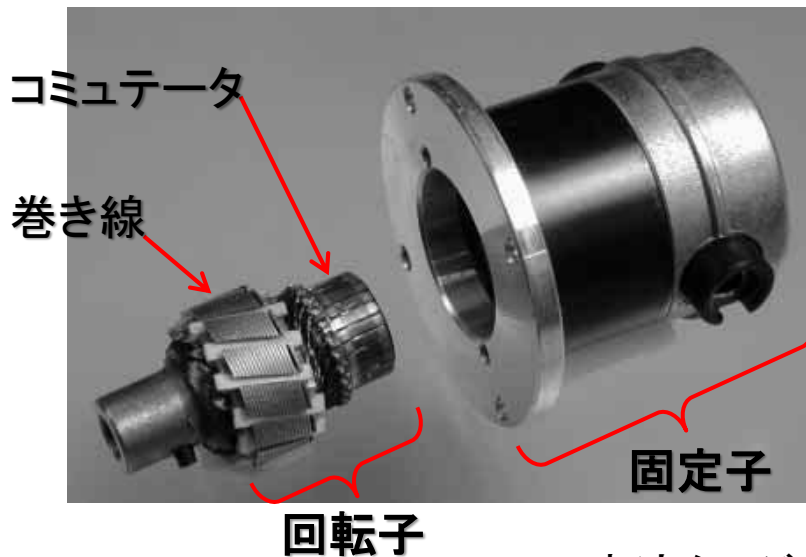
(1) タコジェネレータ

回転速度 v [m/s]に比例した直流電圧 E [V]を出力できる、速度センサである

$$E = nBv$$

B [T]:磁束密度 n [回]:コイルの巻き数

構造は、直流モータと同じで、回転子に巻き線とコミュテータ(回転軸に取り付けた電極、これで直流に変換する)及びブラシ、固定子に永久磁石がある

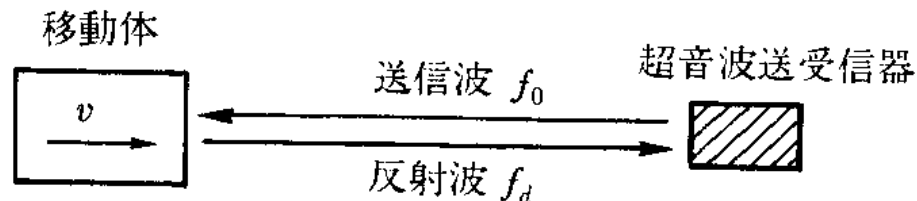


<直流タコジェネレータの構成と断面図>

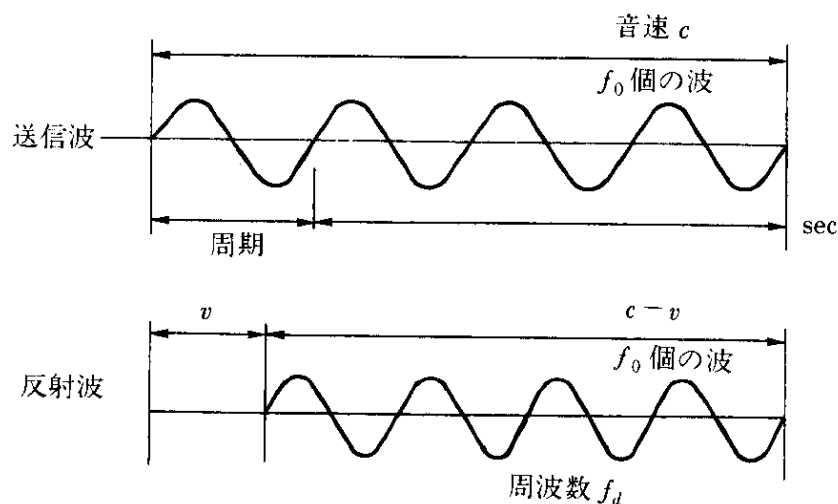
(2) ドップラ効果形センサ

<ドップラー効果とは>

波（音波や光波や電波など）の発生源（音源・光源など）と観測者との相対的な速度によって、波の周波数が異なって観測される現象である。波の発生源が**近付く場合**には、波の振動が詰められて**周波数が高くなり**、逆に**遠ざかる場合**は、振動が伸ばされて**周波数は低くなる**。



(a) 超音波速度センサ



(b) ドップラー効果の原理

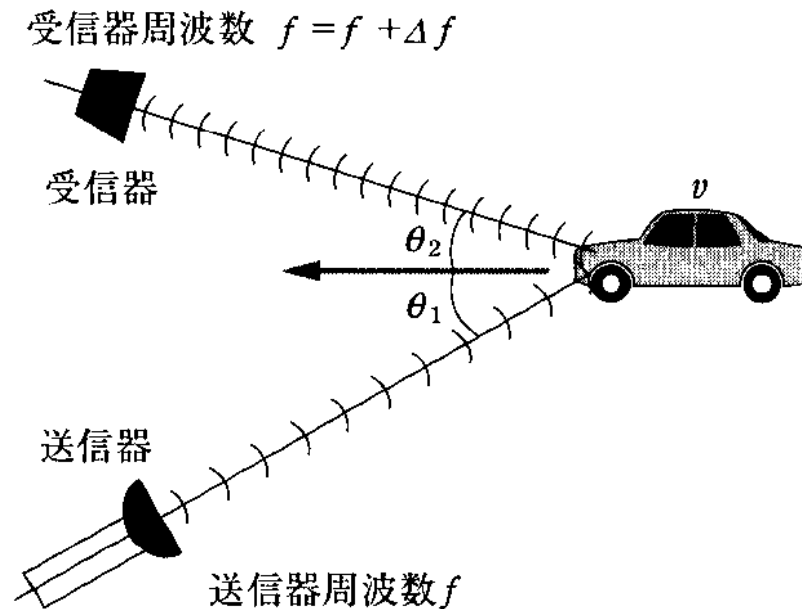
$$f_d = f_0 \frac{c}{c - v}$$

移動物体の速度 v [m/s]
波の(位相)速度 c [m/s]
送信波の周波数 f_0 [Hz]
受信波の周波数 f_d [Hz]

波長 λ の波を、移動物体に対して角度 θ_1 で入射し、角度 θ_2 で反射した波を受信したとき、ドップラー効果によって、受信波の周波数 f_2 と送信波の周波数 f_1 の間には、周波数差 Δf を生じる

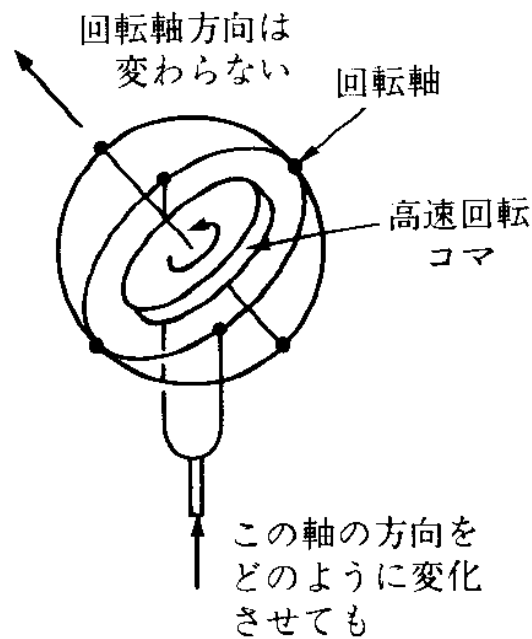
周波数差 Δf と移動物体の速度 v の間には、式(6・7)で示される関係が成り立つ

$$v = \frac{\Delta f \lambda}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \quad (6 \cdot 7)$$

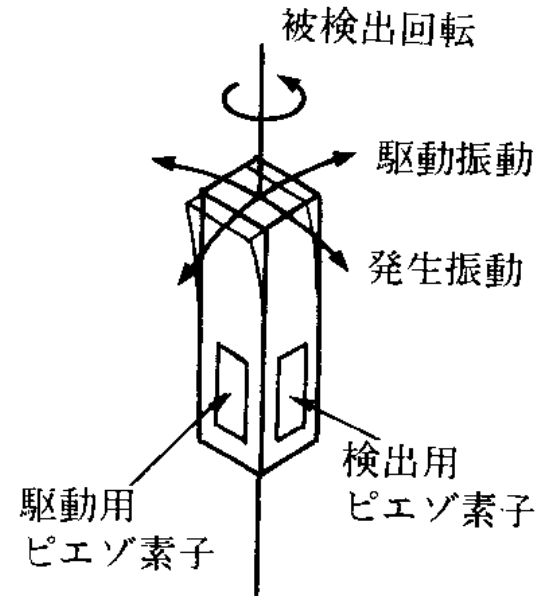


(3) ジャイロスコープ

ジャイロスコープは、高速回転する物体の軸が、一定方向に向きを保とうとする性質を利用したもので、角速度や方位センサとして使用する



<ジャイロスコープの原理(コマの方向保持)>



<振動ジャイロスコープの原理>

振動している物体に回転力が加わると、振動方向に対して直角に **コリオリ力** f_c が発生する

$$f_c = 2m\omega v \quad (6.8)$$

m: 回転物体の質量 ω : 回転角速度 v: 振動速度

【問題1】

シリコン半導基板の裏面にダイヤフラムを作成し、表面にピエゾ抵抗効果形ひずみゲージを取り付けた、圧力センサを何と呼ぶか？ 次のa.～c.より選べ

- a. 静電容量形圧力センサ
- b. 半導体圧力センサ
- c. ストレインゲージ

【問題2】

ロータリエンコーダは、物体のどの力学量を測定することができるか？ 次のa.～c.より選べ

- a. 回転方向
- b. 速度
- c. 加速度

【問題3】

アブソリュート形ロータリエンコーダ(2進数4bit出力)を使って、物体の回転角度を測定したら $90[^\circ]$ であった。このときの出力コードを答えよ。ただし、基準点($0[^\circ]$ のとき)の2進数出力コードは $b_0(\text{LSB})=0, b_1=0, b_2=0, b_3(\text{MSB})=0$ である。

B3	b2	b1	b0	回転角度 $[^\circ]$
0	0	0	0	0(基準点)
0	0	0	1	22.5
?	?	?	?	45
?	?	?	?	67.5
?	?	?	?	90
	:			:
1	1	1	1	360

【問題3】

アブソリュート形ロータリエンコーダ(2進数4bit出力)を使って、物体の回転角度を測定したら $90[^\circ]$ であった。このときの出力コードを答えよ。ただし、基準点($0[^\circ]$ のとき)の2進数出力コードは $b_0(\text{LSB})=0, b_1=0, b_2=0, b_3(\text{MSB})=0$ である。

B3	b2	b1	b0	回転角度 $[^\circ]$
0	0	0	0	0
0	0	0	1	22.5
0	0	1	0	45
0	0	1	1	67.5
0	1	0	0	90
	:			:
1	1	1	1	360

【問題4】

ピエゾ抵抗形加速度センサを使って、質量 $m=10$ [g]の物体の加速度 α を測定したら、 $\alpha = 10$ [m/s^2]であった。このときの物体の変位量 δ [m]を求めよ。ただし、この加速度センサのバネ係数は $k=1$ とする。

式(6・5) $m\alpha = k\delta$ より

$$\delta = \frac{m\alpha}{k} = \frac{10 \times 10}{1} = 100 [m]$$

本日の提出課題

【問題5】

周波数 $f=300[\text{kHz}]$ の電波を、移動体に対して $\theta_1=60[^\circ]$ の角度で発信した。移動体からも同じく $\theta_2=60[^\circ]$ の角度で反射波 $f=302[\text{kHz}]$ を受信した。このときの移動体の速度 $v[\text{m/s}]$ を求めなさい。

$$\text{波長 } \lambda = \frac{c}{f}$$

c : 電波の速度($3 \times 10^8[\text{m/s}]$)

$$v = \frac{2 \times 10^3 \times \frac{3 \times 10^8}{300 \times 10^3}}{\cos 60[^\circ] + \cos 60[^\circ]} = \frac{2 \times 10^3 \times 1 \times 10^3}{0.5 + 0.5} = 2 \times 10^6 [\text{m/s}]$$