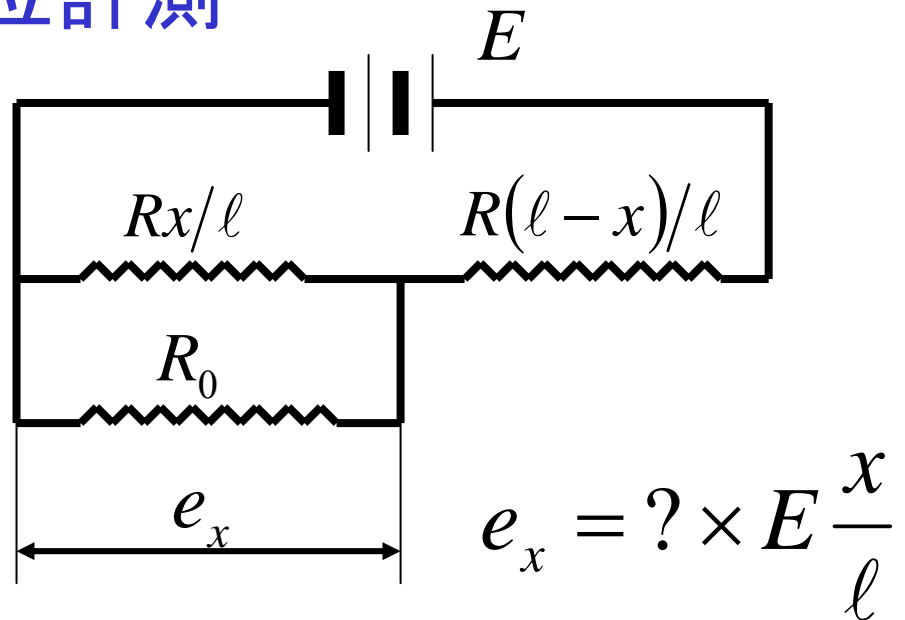
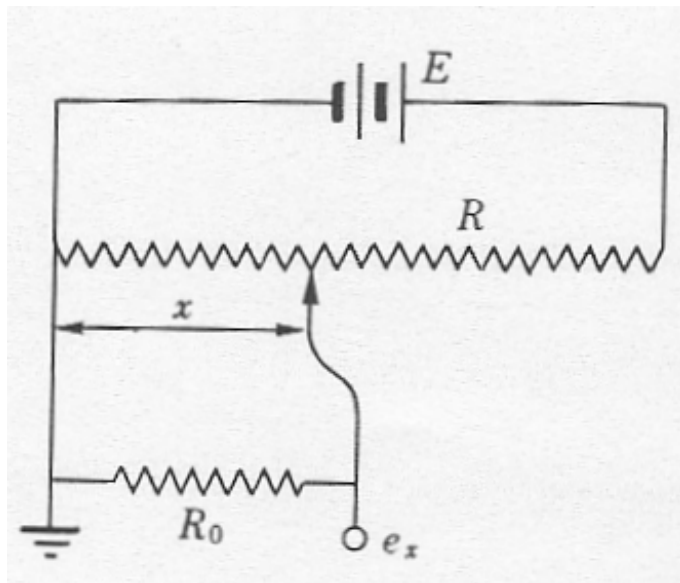


電気要素

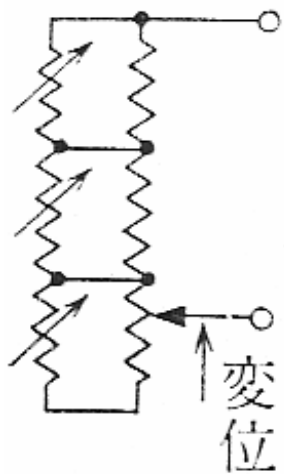
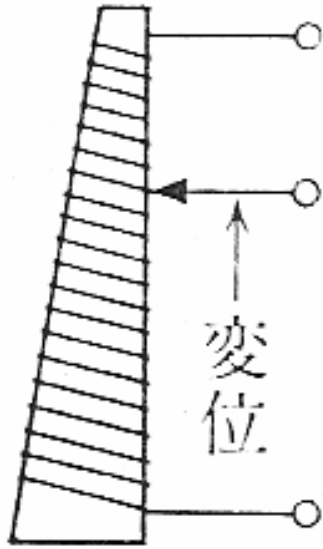
電気回路の要素(抵抗, 容量, インダクタンス)のインピーダンスの変化利用

電気抵抗

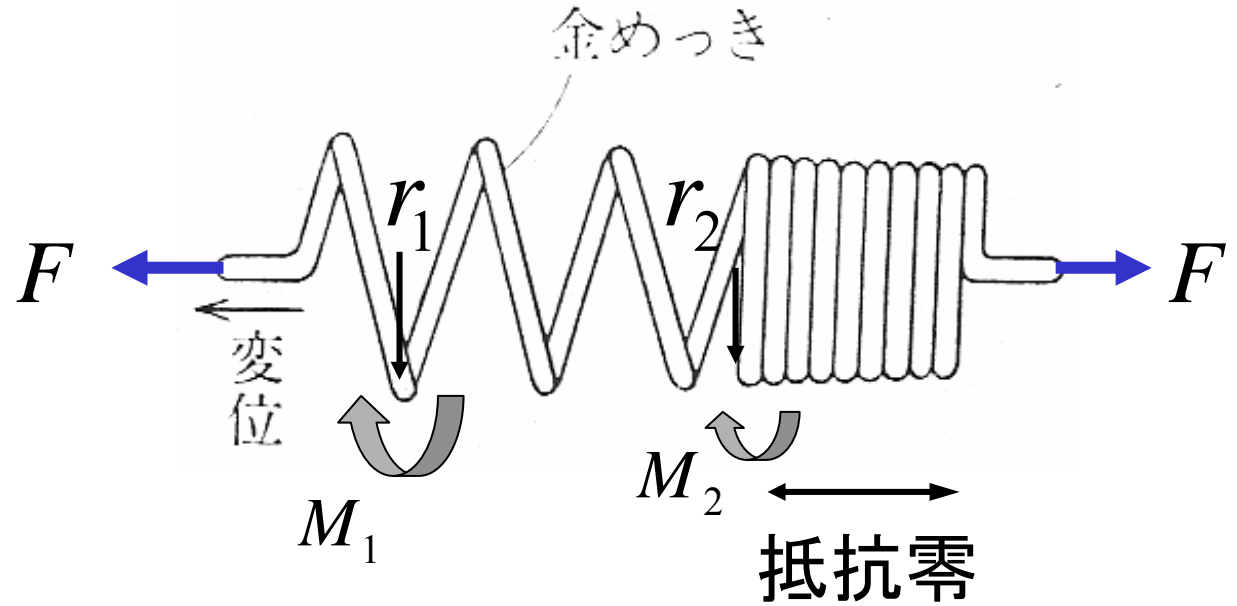
(1) 電気抵抗による変位計測



関数抵抗



ばね抵抗



$$M_1 = F \cdot r_1, M_2 = F \cdot r_2$$

$$r_1 > r_2 \quad \therefore M_1 > M_2$$

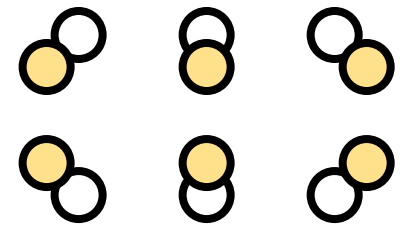
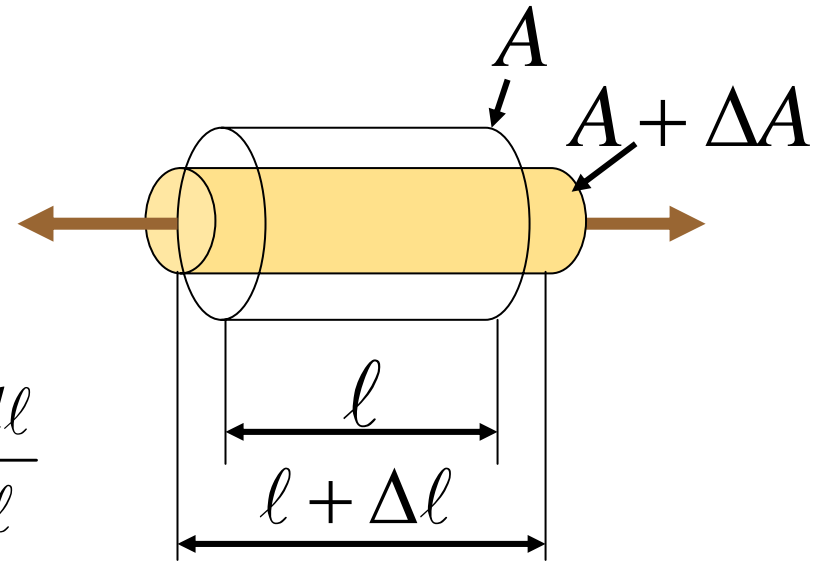
(2) 電気抵抗によるひずみ計測

(a) 金属抵抗線ひずみゲージ

$$R = \frac{\rho l}{A}$$
$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\nu) \frac{dl}{l}$$

$$\therefore \frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} = -2\nu \frac{dl}{l}$$

ゲージ率 K $K = \frac{dR/R}{dl/l}$ $K = 2, (4)$



抵抗線材料

常温： マンガニン, アドバンス, コンスタantan

高温： ニクロムV, カルマ (Ni73, Cr20, Al+Fe7),
白金イリジウム

計測可能にするための抵抗線の長さ

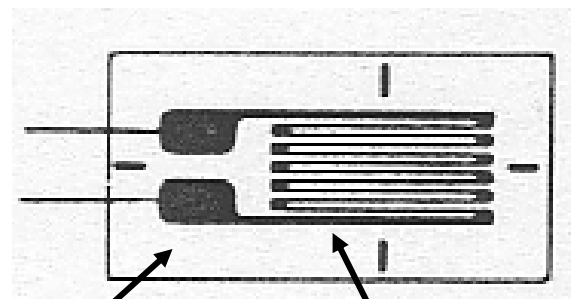
一方、計測箇所の大ささ



→ 両者を満たす
ひずみゲージの形状

[箔ひずみゲージ]

ベース: エポキシ樹脂

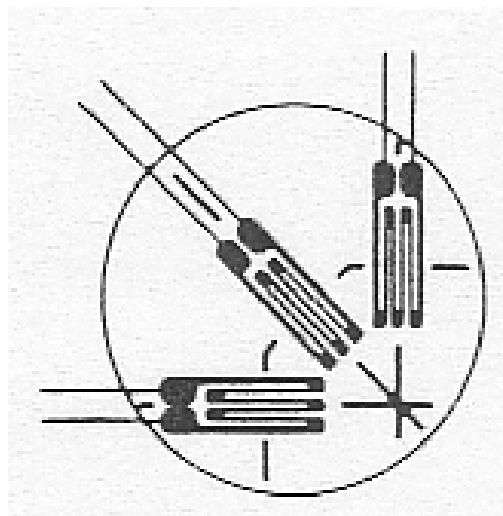


厚さ4~20 μm
ホットエッチング

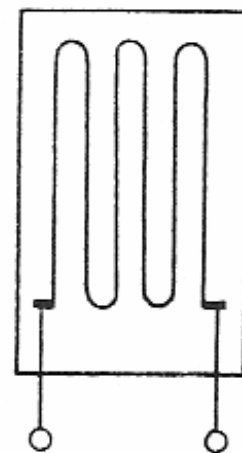
- ・パターンは任意
- ・放熱性良好 → 許容電流大 → 増幅器なしで測定可能
- ・絶縁性良好 → 水中でも使用可能
- ・リード線取付け部での断線の恐れ少ない

箔ひずみゲージのパターンの例

3方向用



線ひずみゲージ
最近はあまり使用されない



ひずみ測定範囲 = $10^{-3} \sim 10^{-6}$

抵抗値 = $120 \Omega, 350 \Omega$ (50 ~ 2000 Ω)

(b) 半導体ひずみゲージ

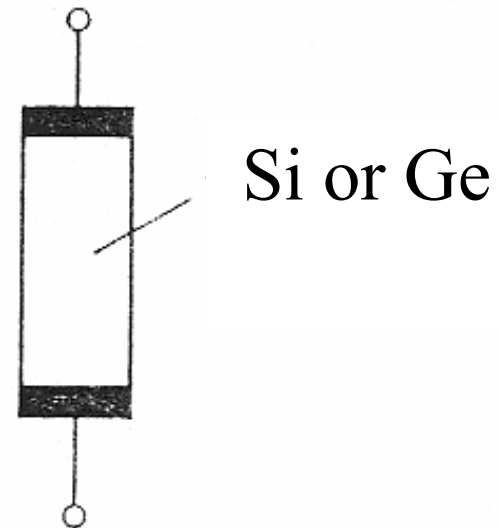
Si, Ge の半導体結晶

ピエゾ抵抗効果(応力付加 → 固有抵抗変化)が大きい

$$|K| = 100 \sim 175$$

たとえば, 10^{-4} のひずみ → 0.25 V の出力

動的ひずみ(衝撃弾性波)を
そのままオシロスコープに入力
可能



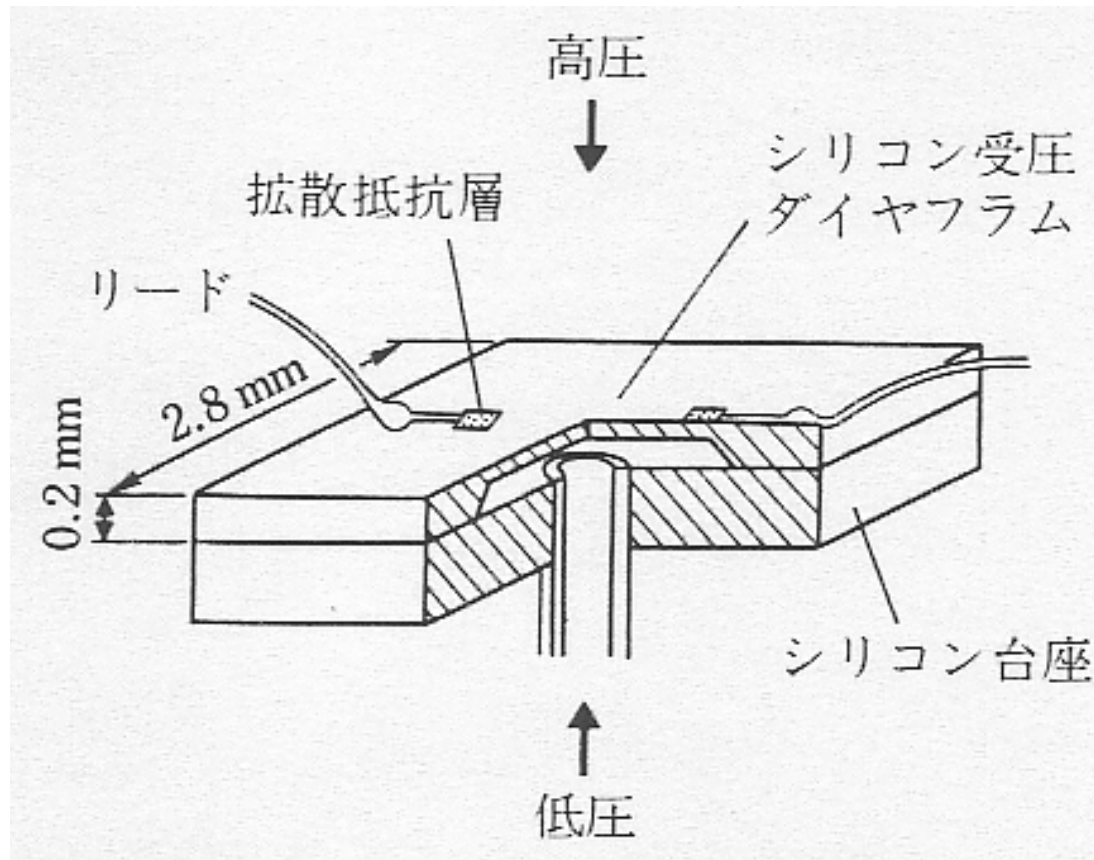
p 型半導体: $K > 0$ \Leftrightarrow n 型半導体: $K < 0$

Si 上に LSI = 各種, 電子回路, 素子, 増幅器, 制御部

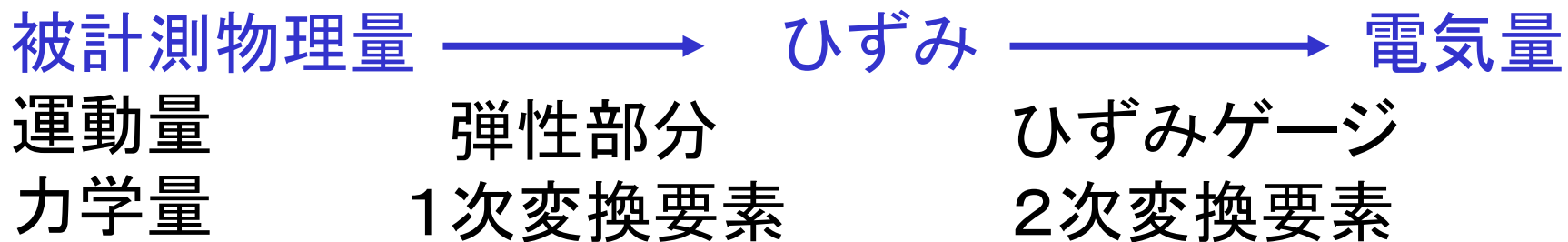
Si は優れた弾性材料

半導体製造技術

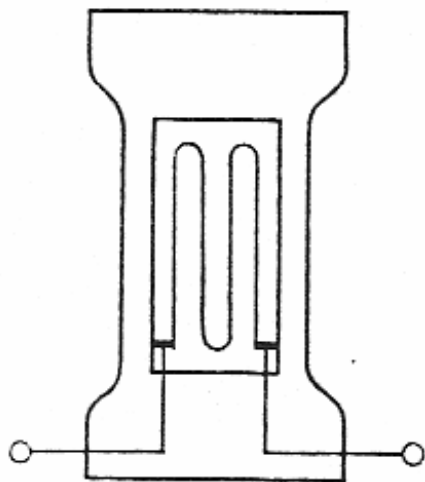
\Rightarrow 小型の“集積化センサ”, “スマートセンサ”



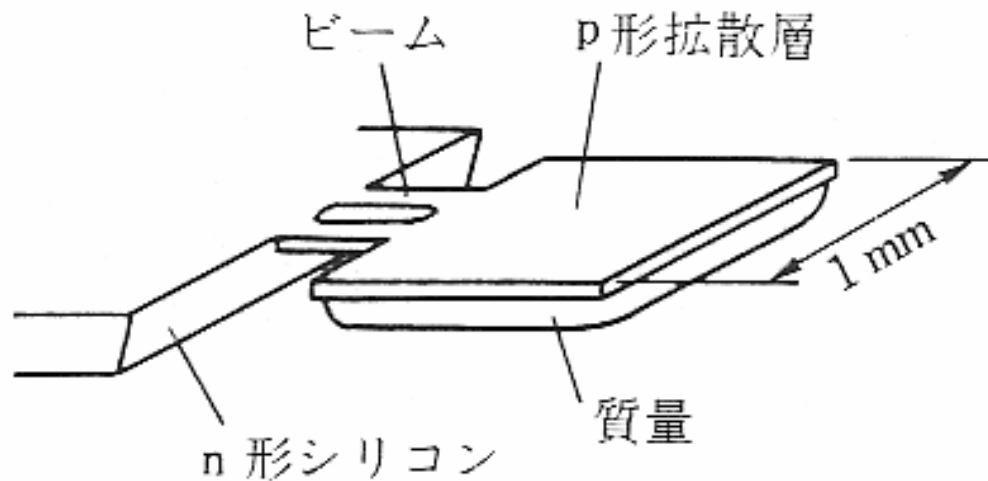
ひずみゲージ = 2次変換要素としての役割



運動量(加速度など), 力学量(力, 応力, トルクなど)



ロードセル



加速度センサ

(3) 電気抵抗による温度計測

(a) 測温抵抗体

金属, 半導体の電気抵抗: 温度の関数

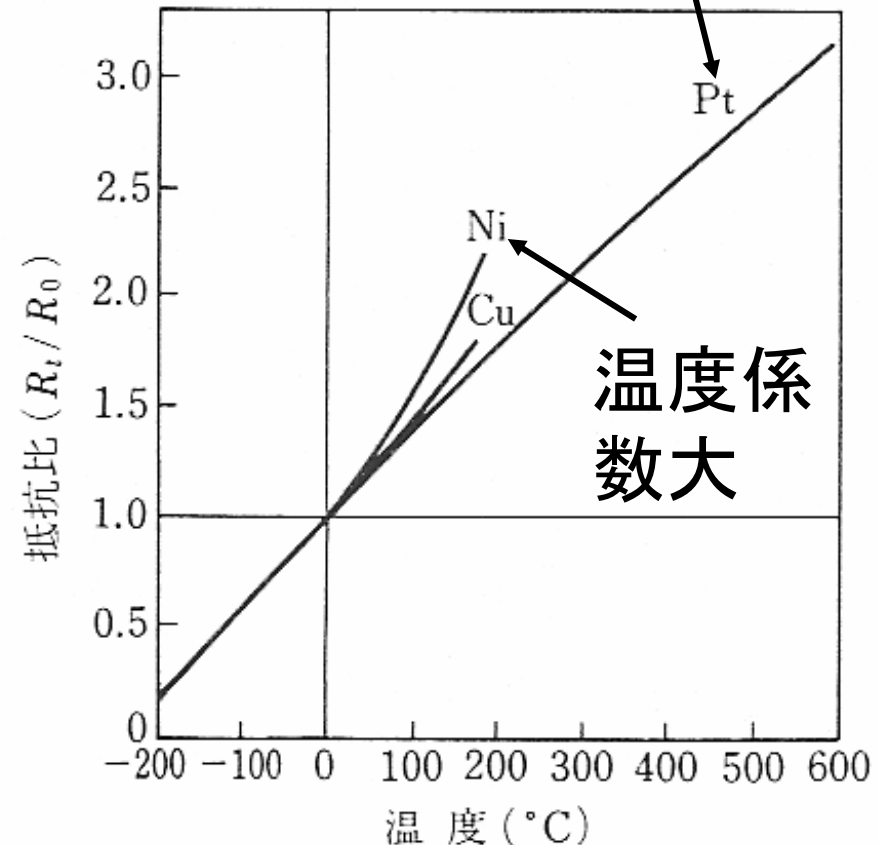
純金属の温度による電気抵抗変化

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2 + \dots)$$

素線材料の特性

- ・ 抵抗の温度係数
= 大, 直線性, 安定性
- ・ 広い温度範囲で使用可能
- ・ 適当な抵抗値
- ・ 加工容易

非常に安定
線形



[白金(Pt)]

広く工業計測に使用(JISで規定)

国際実用温度目盛(IPTS-68):

−259.3°C ~ +630.7°Cの標準温度計

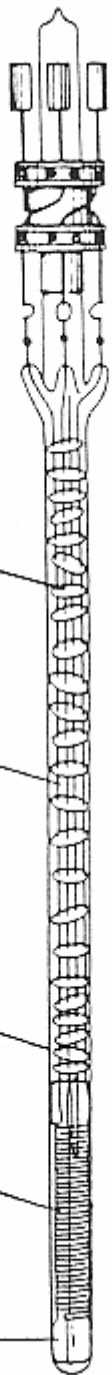
Φ0.03 ~ 0.1 mm, 加熱焼鈍 → 無ひずみ

$R_0 = 50, 100 \Omega$

R_{100}/R_0

Pt: 1.392, Ni: 1.625, Cu: 1.433

ガラス封入形



マイカ円板

Cu リード

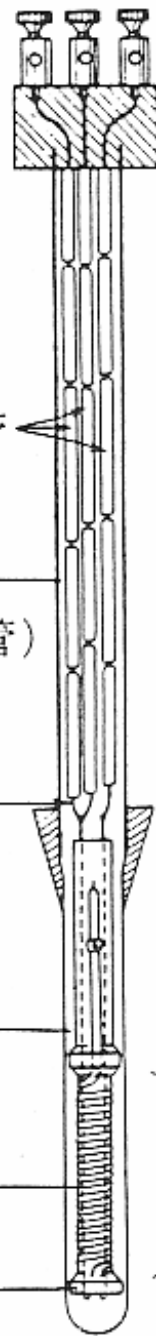
ガラス

Pt

抵抗素子部

十字マイカ枠

シース形



絶縁管

シース
(ステンレス鋼管)

Cu リード

無機絶縁体

Pt

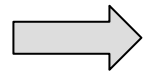
抵抗素子部

らせん溝付
磁器円筒

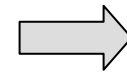
全体を保護管に入れる

温度影響部
リード線3本!

素線： 機械的に弱い

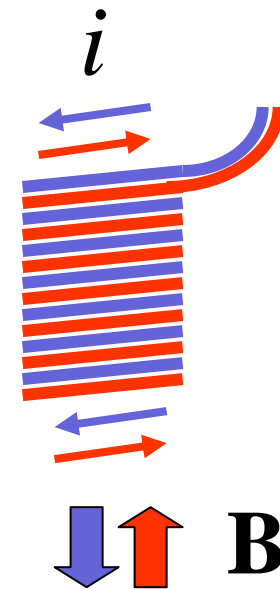
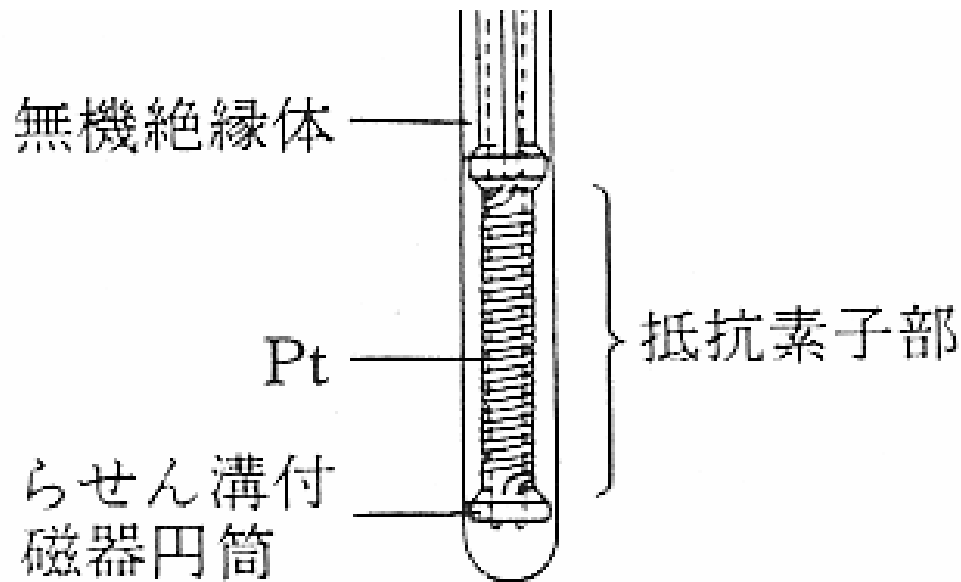


張力が加わらない形状
屈曲部がない形状



巻き形状

2重巻き線



(2) サーミスタ (thermister, 酸化物系)

thermally sensitive resistor

遷移金属 (Ni, Mo, Co)

酸化物の複合焼結体

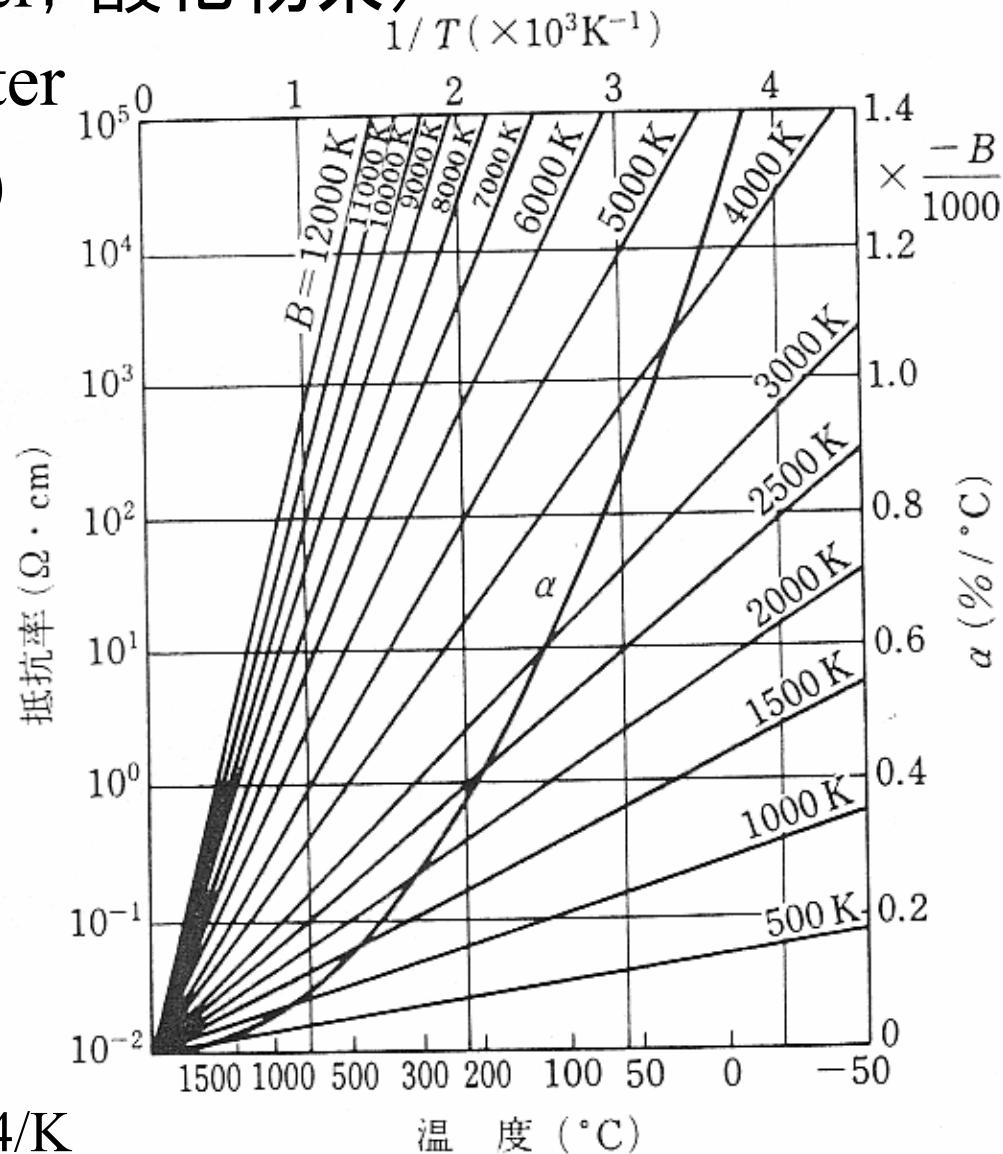
大きな負の温度係数

$$\frac{R}{R_0} = e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

$$\ln \left(\frac{R}{R_0} \right) = B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

$$B = 4,000\text{K}, T = 300\text{K} \rightarrow \alpha = 0.44/\text{K}$$



NTC (negative temperature coefficient) サーミスタ

NTC サーミスタ

トランジスタ回路の温度補償, 温度測定, 制御

PTC (positive temperature coefficient) サーミスタ

ポジスター, 正の温度特性

BaTiO₃に微量のLa, Ceの

焼結体

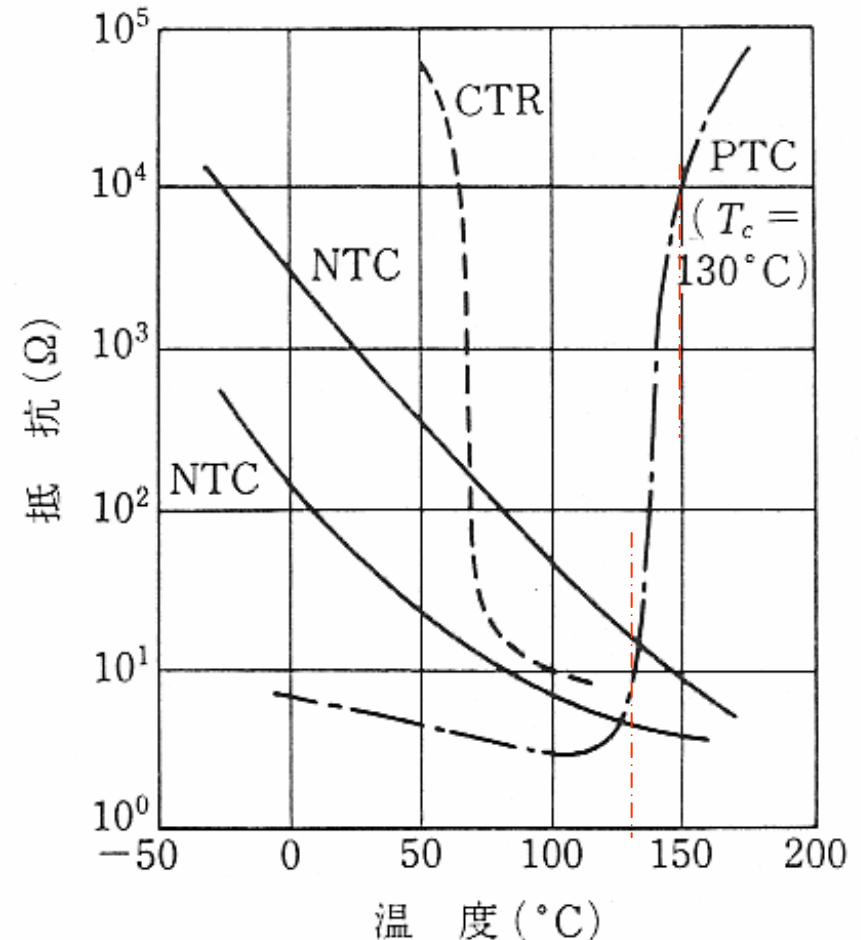
僅かな範囲で温度急上昇

CTR

(critical temperature resistor)

負の温度係数, 温度変化急

PTC, CTR: 温度スイッチ



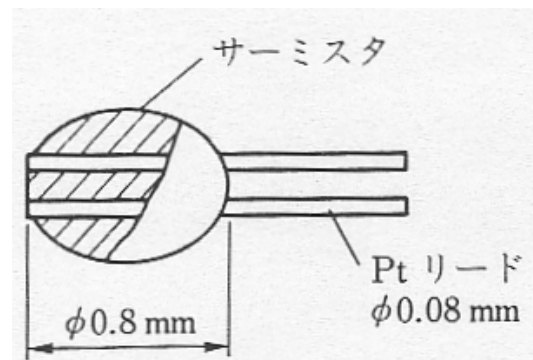
サーミスタの構造

サーミスタ温度センサ

素子寸法小さく, 応答速く,
温度変化による抵抗変化大
微小温度変化も測定可能

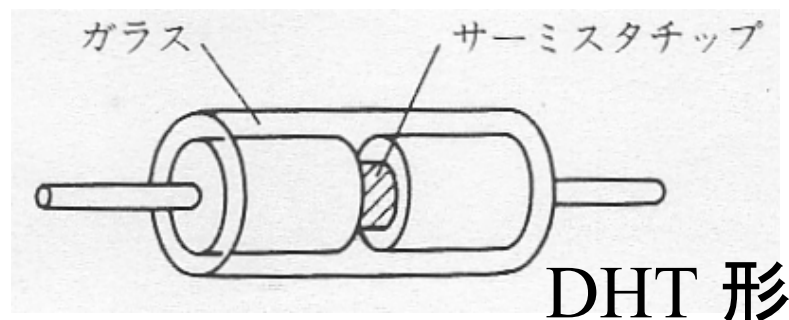
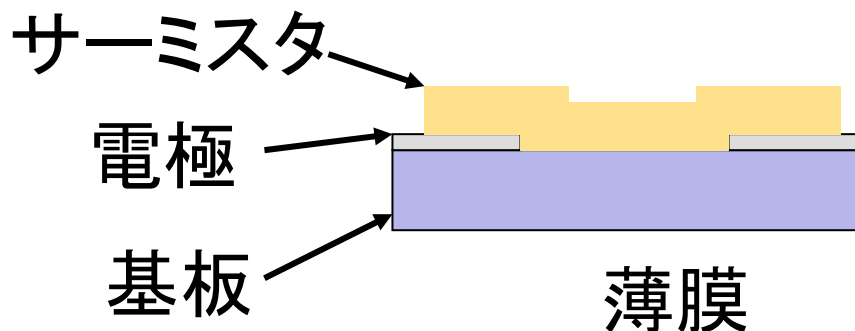
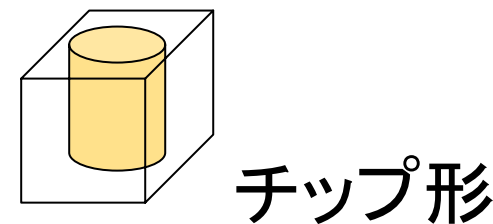
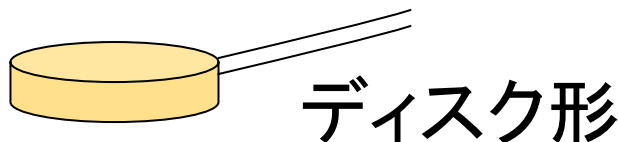
従来は精度低い

高精度化: チップ形, DHT 形



ビード形

ガラス被覆, レジン被覆



(3) サーミスタ(非酸化物系)

n 形シリコン: 不純物による電子散乱が温度で増加
⇒ PTC サーミスタ

温度係数 = $0.0075/^{\circ}\text{C}$ (15°C), $0.006/^{\circ}\text{C}$ (150°C)

Si チップ → Si 温度センサ

SiC, SnSe, TaN

リソグラフィ技術 → 薄膜化 → 高精度化
熱応答性速く, 抵抗率範囲広く,
B 定数および抵抗値精度高く, 互換性高い

電気抵抗による圧力計測

$$R = R_0(1 + \beta p + \dots)$$

R_0 : 大気圧下における抵抗, β : 圧力係数

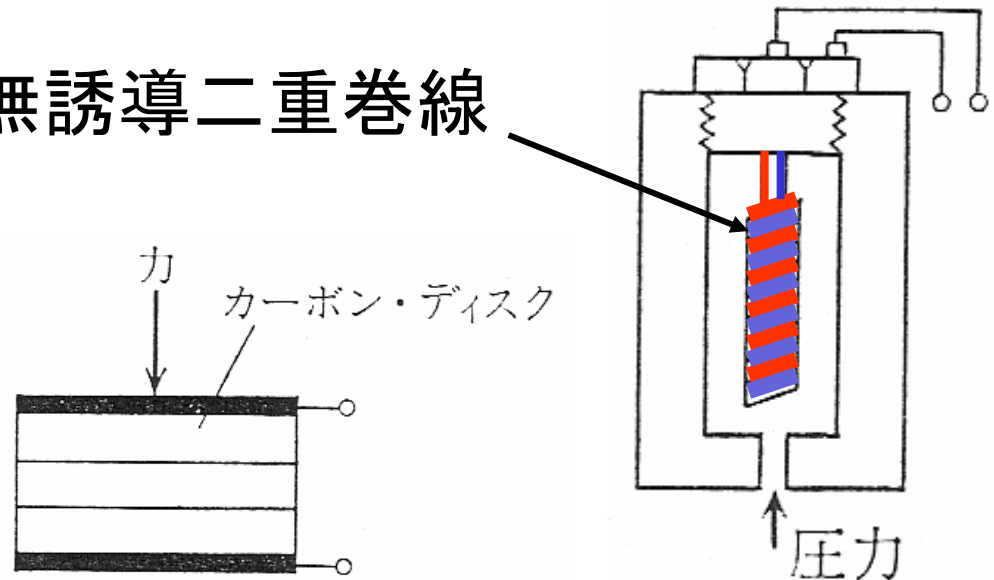
温度の影響のない材料, 温度係数の小さい合金

マンガン： 温度係数零, 圧力 / 抵抗 = 直線

$$\beta = (2.1 \sim 2.4) \times 10^{-5} / \text{MPa}$$

$\phi 0.1\text{mm} \times 5\text{m}$, 無誘導二重巻線

2 GPa



電気抵抗による湿度計測

MgCrO₄-TiO₂ セラミック湿度センサ

吸湿による電気抵抗変化利用

化学吸着水酸基を解離しやすくした材料

多孔質セラミック

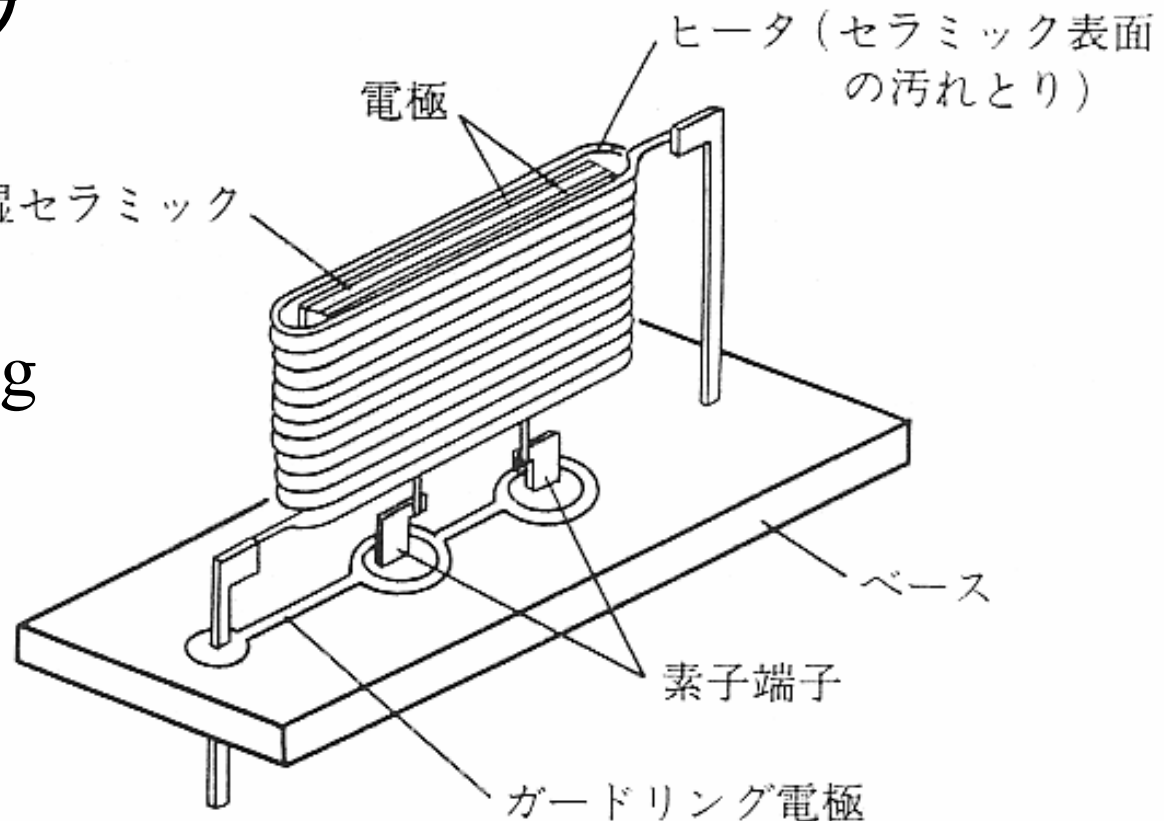
粒間気孔

粒径1 μm

気孔率25%

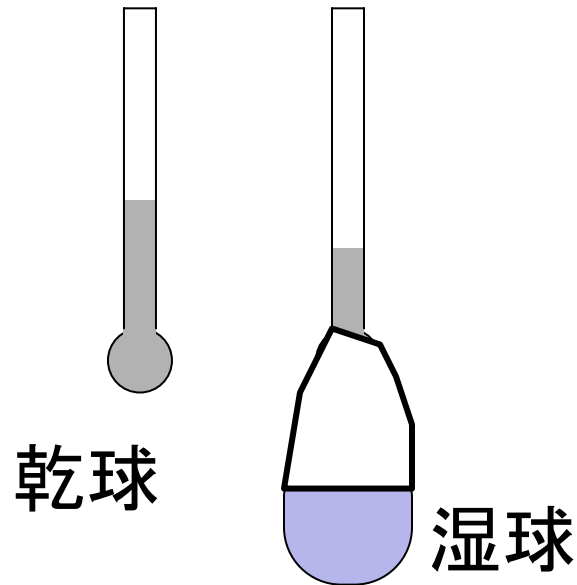
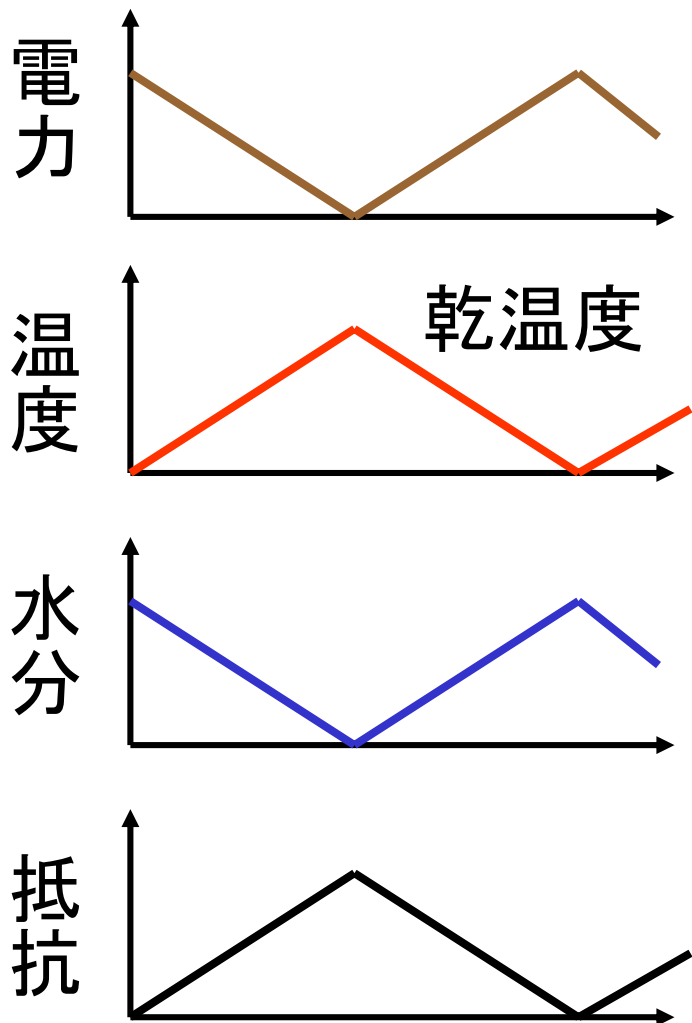
比表面積0.1m²/g

感湿セラミック

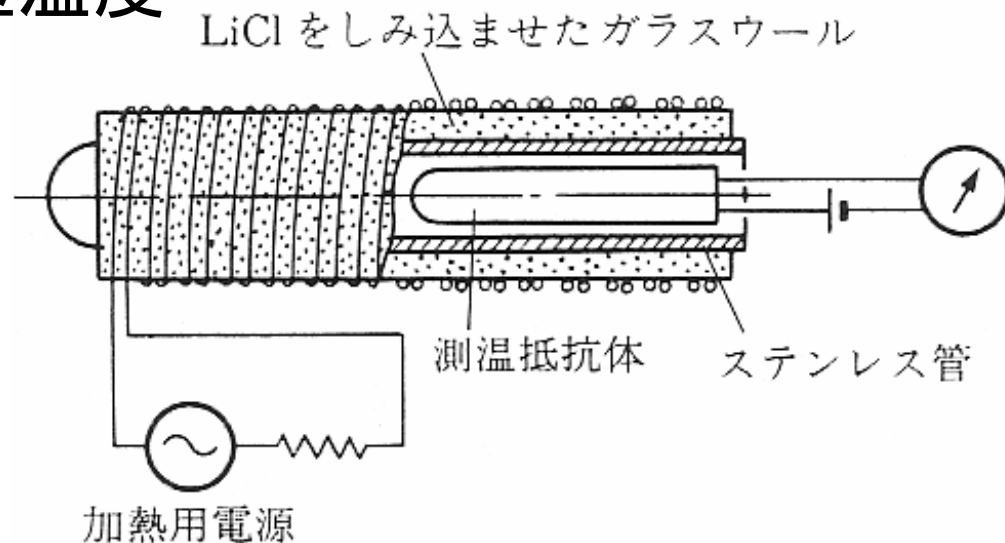


塩化リチウム湿度センサ

乾湿温度計: 温度差 \Rightarrow 湿度



湿温度



サーミスタ湿度センサ

熱伝導現象を利用

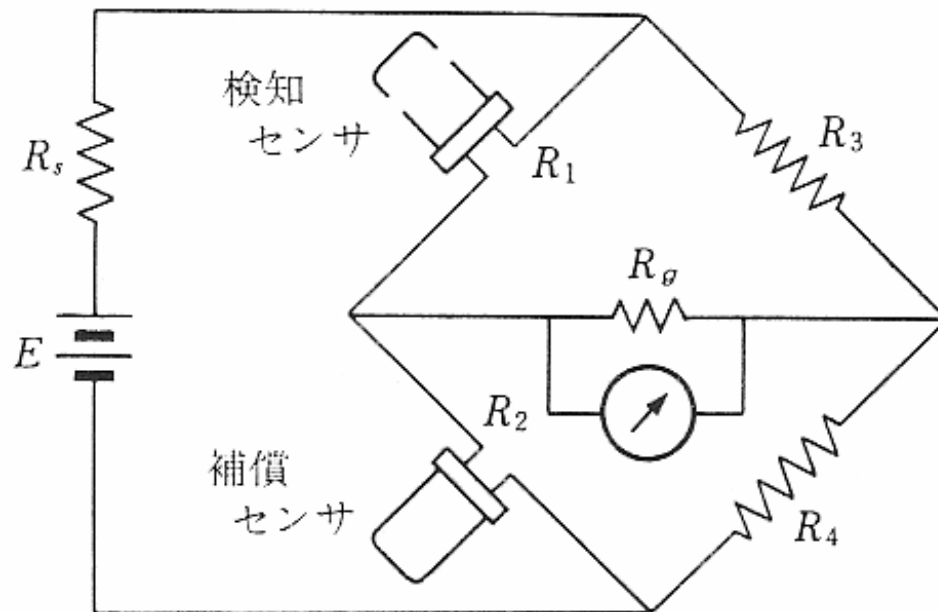
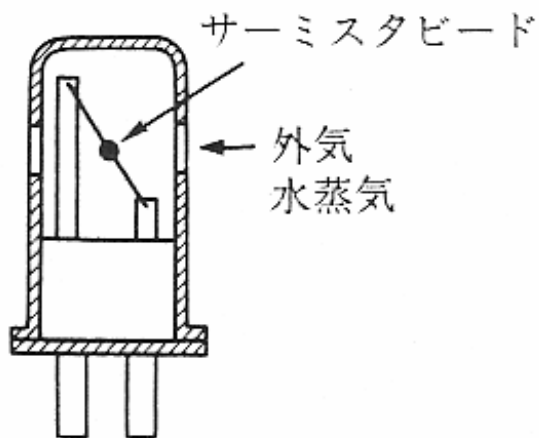
(1) 乾燥空気中で平衡

(2) サーミスタに通電して、約 200°C に加熱

(3) 水蒸気雰囲気 → 不平衡電圧

絶対湿度検知

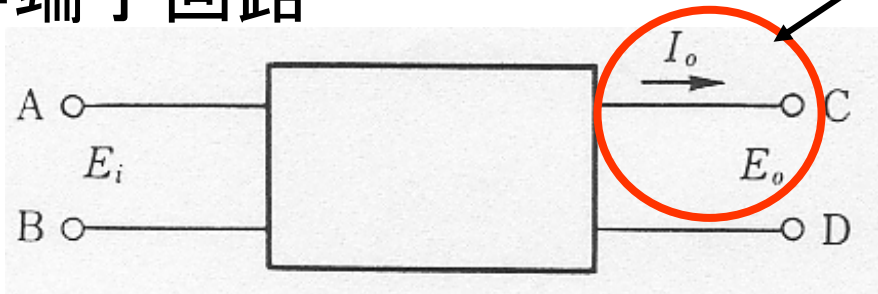
12~13秒で応答



電気抵抗検出のための回路

(1) 抵抗線ひずみゲージ

4端子回路



当初零にできる
= 平衡条件

僅かなインピーダンス
変化 ⇒
検知信号 = 大きな変化

Wheastone bridge

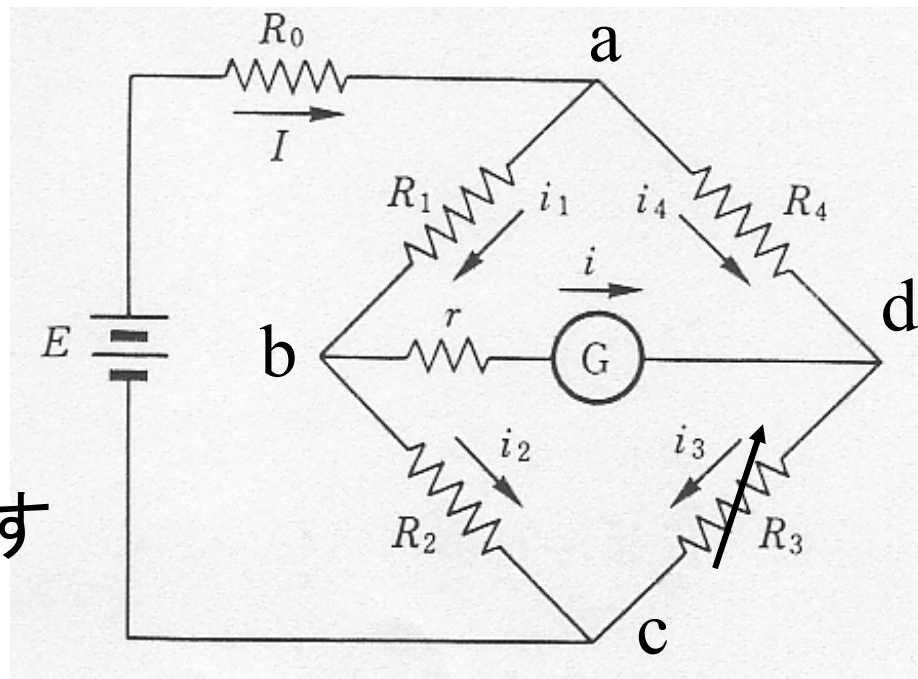
平衡条件

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

または

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

計測前この条件を満たす
ため、1つは可変抵抗



おおよその見積もり

平衡時: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ とする.

抵抗変化 $R_1 = R + \Delta R$

$$V_{ab} \approx \frac{E}{2} \frac{R}{R_0 + R} \frac{R + \Delta R/2}{R},$$

$$V_{ad} \approx \frac{E}{2} \frac{R}{R_0 + R}$$

$$V_{ab} \approx \frac{E}{4} \frac{\Delta R}{R_0 + R},$$

$$i \approx \frac{E}{4} \frac{\Delta R}{(R_0 + R)r}$$

$E = 4V, R = r = 100\Omega, R_0 = 400\Omega, \Delta R = 0.1\Omega$ とすると, $i = 20\mu A$

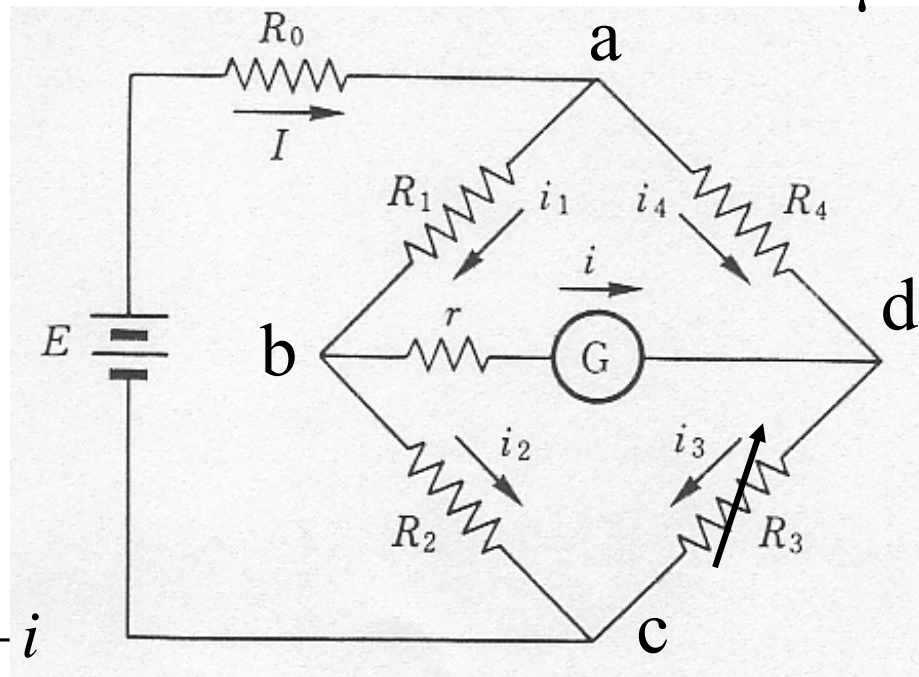
電気回路より

$$R_0 I + R_4 i_4 + R_3 i_3 = E$$

$$R_3 i_3 = R_2 i_2 + r i$$

$$(R_1 + \Delta R) i_1 = R_4 i_4 - r i$$

$$I = i_1 + i_4 = i_2 + i_3, \quad i_2 = i_1 + i$$

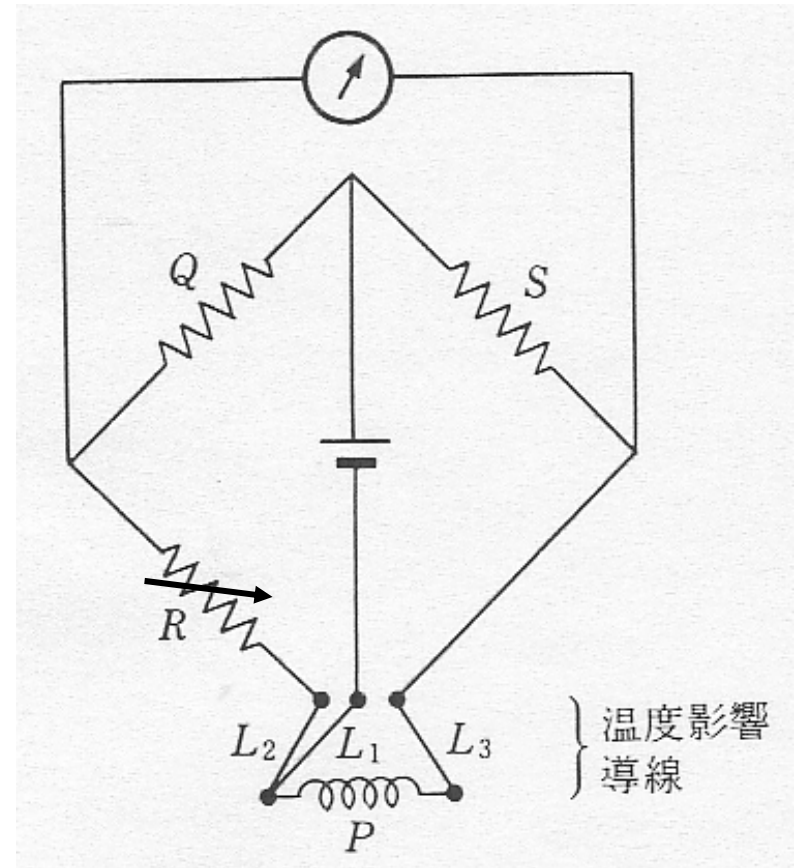


(2) 電気抵抗温度計

Siemens の3線ブリッジ

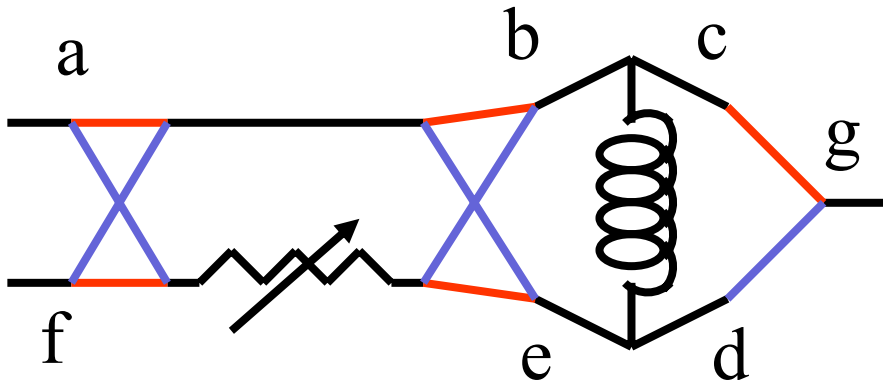
値が不明のリード線の
抵抗の影響を除去

リード線 L_2, L_3 を隣
合う辺に含ませ打ち消
し合わせる



Siemens の3線ブリッジ

Smithの4線ブリッジ



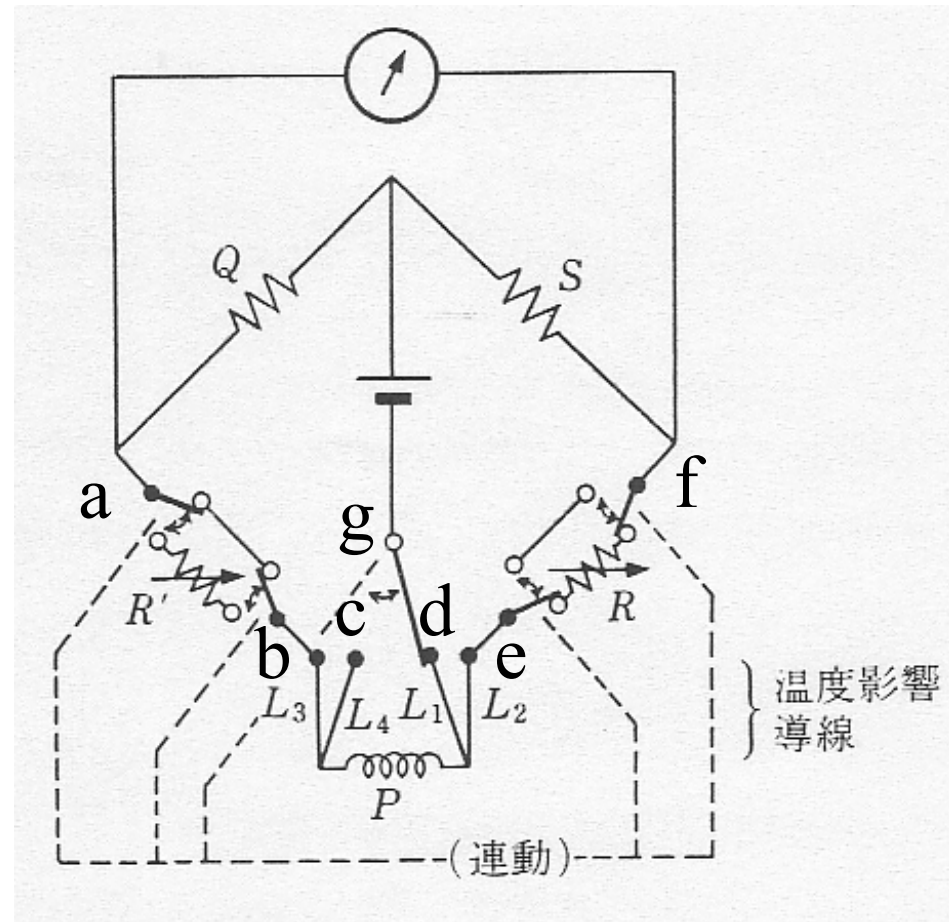
$$P + L_3 = (1 + \varepsilon)(R + L_2)$$

$$P + L_2 = (1 - \varepsilon)(R' + L_3)$$

ただし, $Q/S = 1 + \varepsilon$

$$P = \frac{R + R'}{2} - \frac{\varepsilon}{2}(L_2 - L_3) - \frac{\varepsilon^2}{2}(R + R' + L_2 + L_3)$$

$\varepsilon \ll 1, L_2 \approx L_3$ より $P \approx \frac{R + R'}{2}$



静電容量

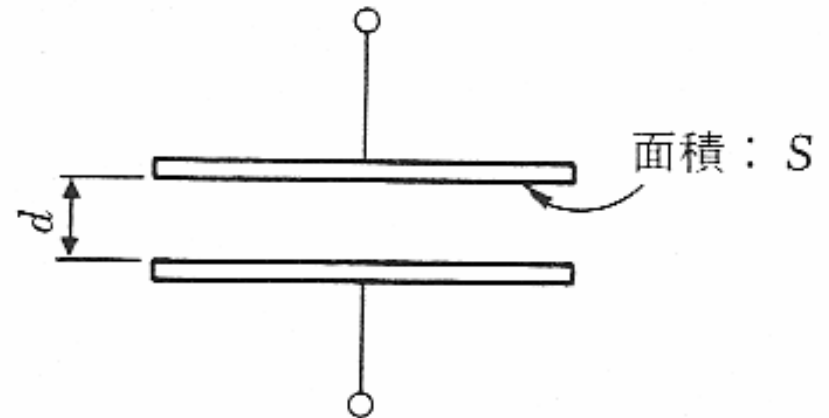
$$C = \frac{\varepsilon S}{d}; \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad \varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi c^2 \times 10^{-7}} \text{ F/m}$$

静電容量による変位計測

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = \frac{\varepsilon S}{d^2} = -\frac{C}{d}$$

$$\text{固有振動数: } \nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta d}{d}$$



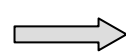
Whiddingtonの超測微計

$$d = 25 \mu\text{m}, \quad \nu = 10^6 \text{ Hz}, \quad \Delta \nu = 1 \text{ Hz} \quad (2\text{波干渉})$$

$$\Delta d = 2 \cdot (1/10^6) \cdot 25 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.05 \text{ nm} \quad \text{原子半径程度}$$

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = \frac{\varepsilon S}{d^2}$$

d 小



感度大, 高精度

測定レンジは大きく取れない

変位-容量の関係が非線形

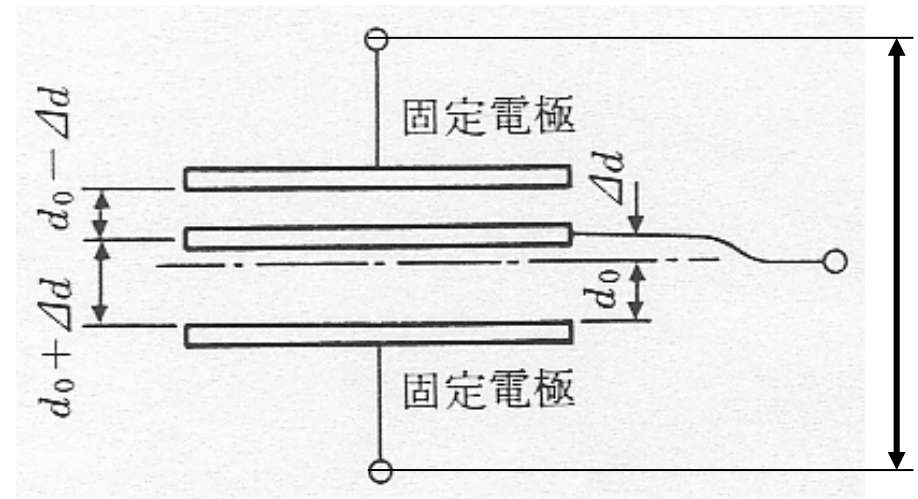
→ 変換係数が一定でない

→ 差動形

$$V_1 = \frac{C_2 \cdot V}{C_1 + C_2} = \frac{d_0 + \Delta d}{2d_0} V$$

$$V_2 = \frac{C_1 \cdot V}{C_1 + C_2} = \frac{d_0 - \Delta d}{2d_0} V$$

$$\Delta V = V_1 - V_2 = V \frac{\Delta d}{d_0}$$



感度係数 $\propto d_0$ →

d_0 が小さいほど高感度

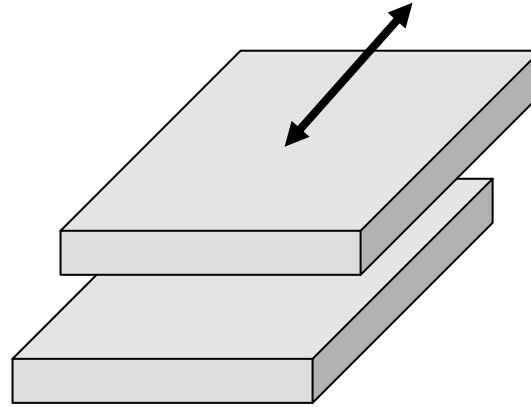
粗さ, 位置決め精度 →

$100 \mu\text{m}$

面積變化

平行平板

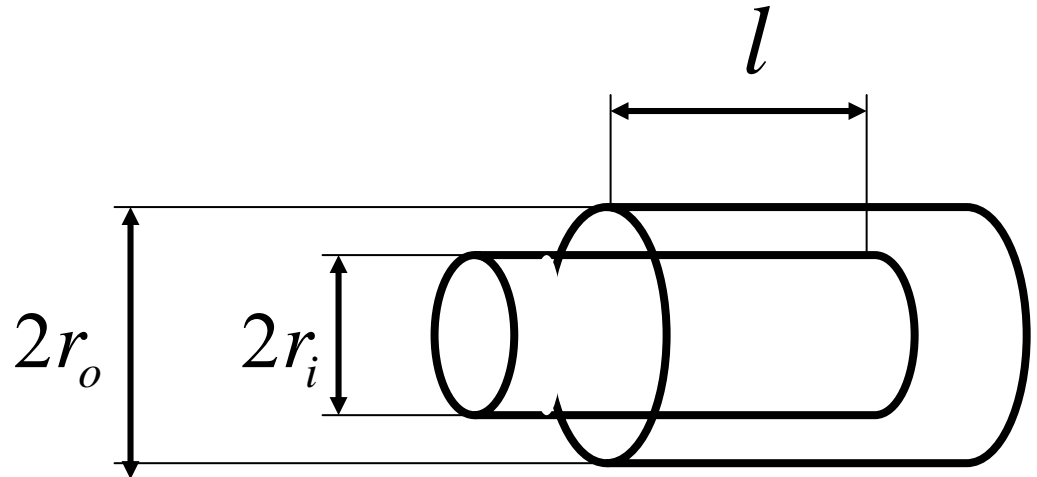
$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = \frac{\varepsilon}{d}$$



同心円筒

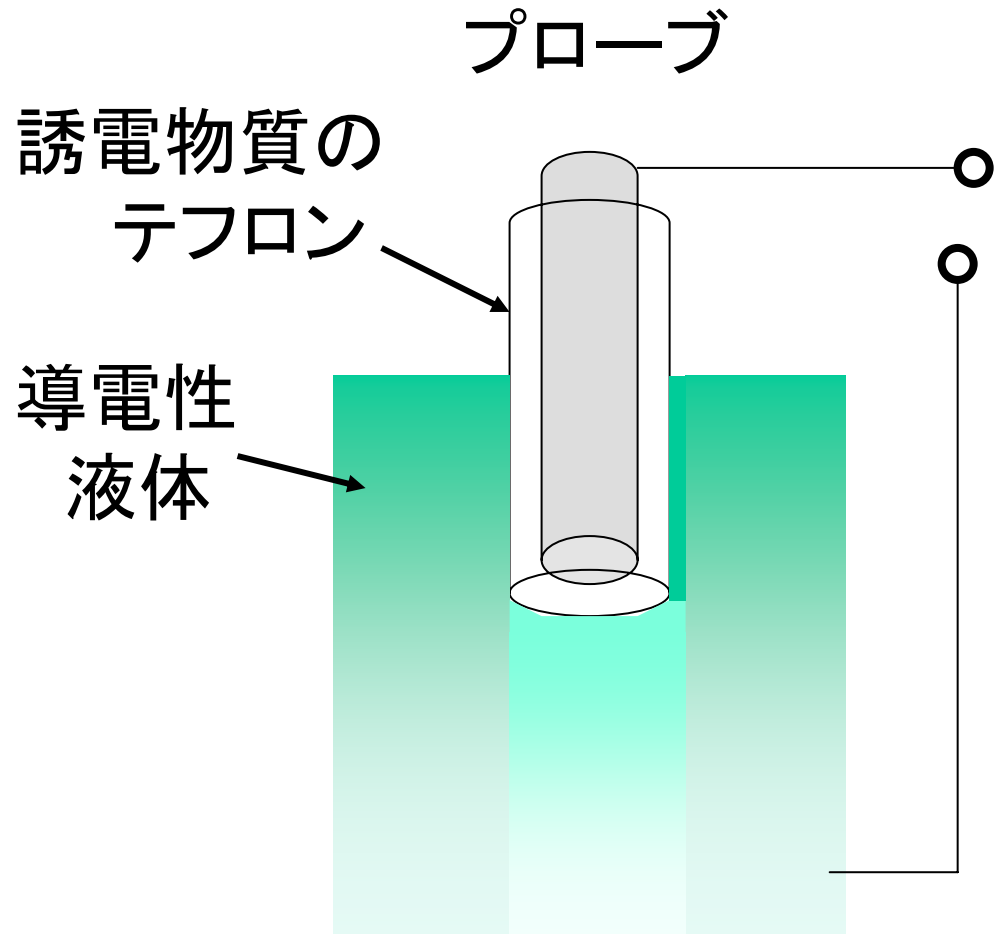
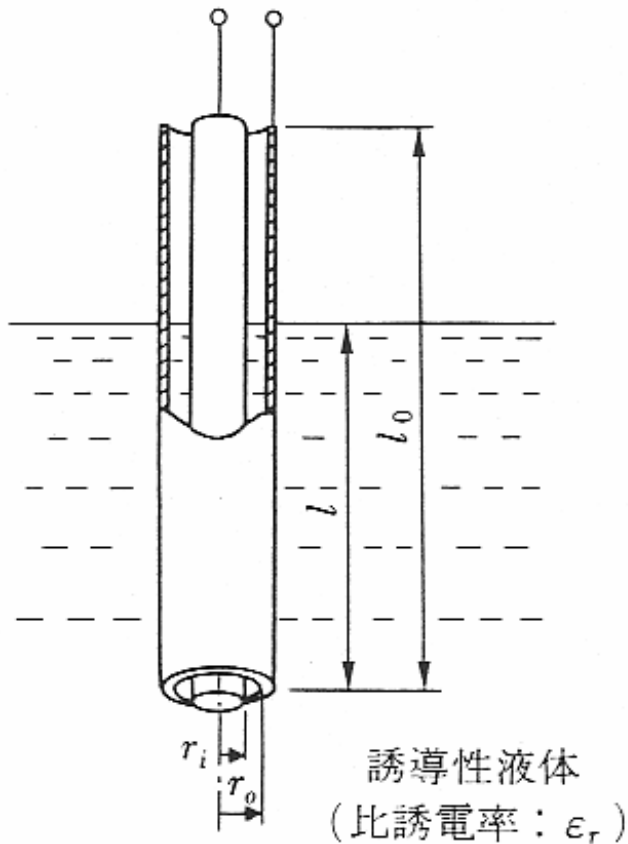
$$C = \frac{\varepsilon l}{\log(r_o/r_i)}$$

$$\frac{\Delta C}{\Delta l} = \frac{\varepsilon}{\log(r_o/r_i)}$$

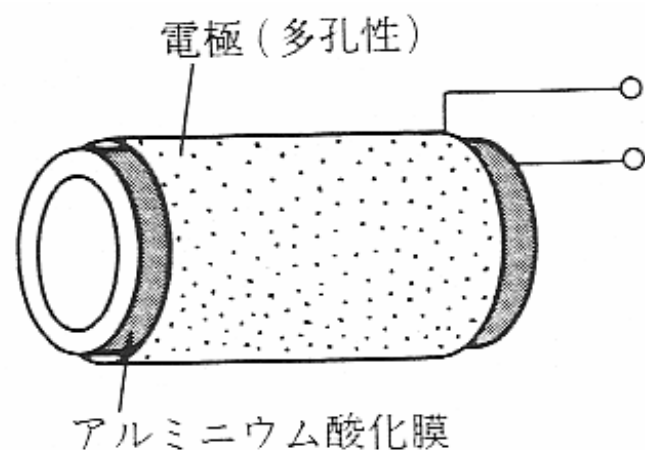


誘電率変化の利用

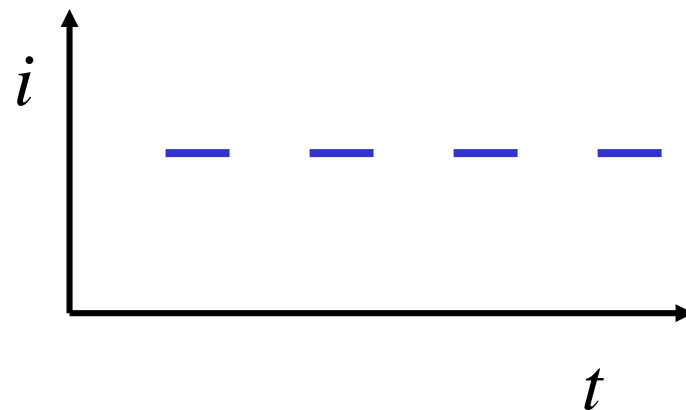
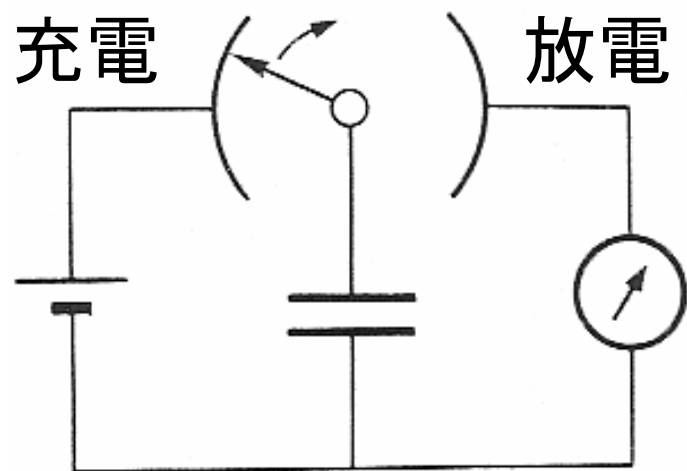
$$C = \frac{\epsilon_0(l_0 - l) + \epsilon_0\epsilon_r l}{\log(r_o/r_i)} = \frac{\epsilon_0\{l_0 + (\epsilon_r - 1)l\}}{\log(r_o/r_i)}$$



静電容量による湿度計測



コンデンサの充放電を利用した回転速度計



インダクタンス

鉄心の磁気抵抗変化

→ インダクタンス変化

(1) インダクタンスによる変位計測

自己インダクタンス $L = \frac{\phi n}{i} = \frac{\mu_0 n^2 S}{l}$

$$\phi = BS, B = \mu_0 \mu_s H, H = \frac{ni}{l_s}$$

透過磁路長さ

$$l = \sum \frac{l_i}{\mu_i}$$

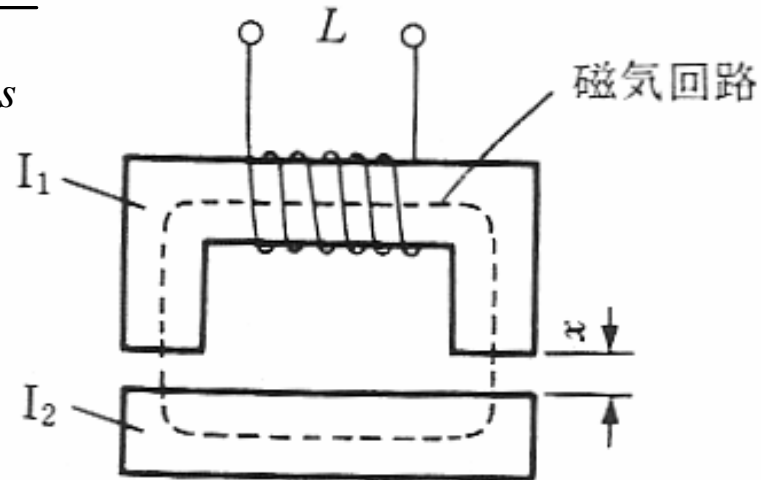
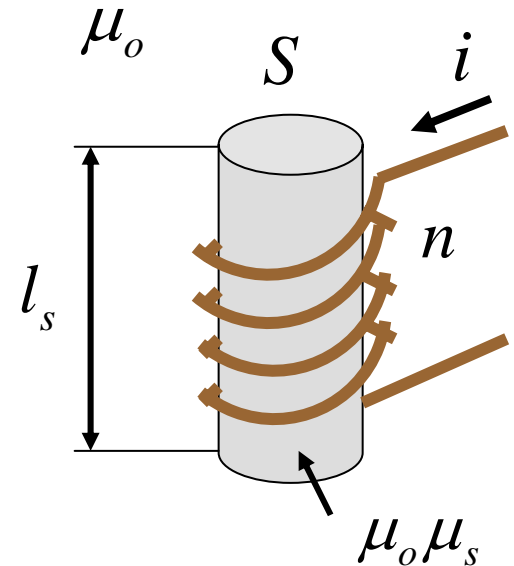
$$l = \frac{l_s}{\mu_s} + \frac{2x}{\mu_x}$$

$\mu_s \approx 0$

$$\because \mu_s \gg \mu_x (=1)$$

$$\frac{dL}{dx} = -\frac{2\mu_0 n^2 S}{(2x)^2}$$

← x が小さいとき高感度,
ただし, 非線形



(2) 渦電流式センサ

ル・シャトリエの法則

「平衡状態にある体系に外から強制力が作用すると、その強制力を弱めるような過程を促進する」

$$\text{rot } \mathbf{i} = -\varepsilon \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

導体内で磁束変化

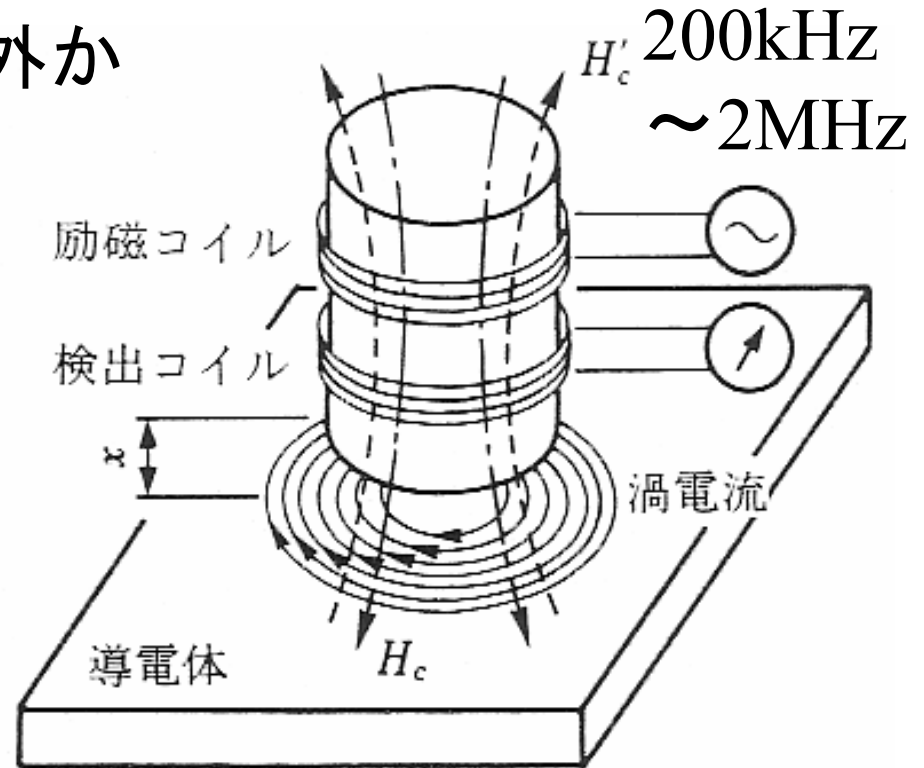
⇒ 渦電流(電流回転)

⇒ 磁界発生

⇒ コイルのインダクタンス減少

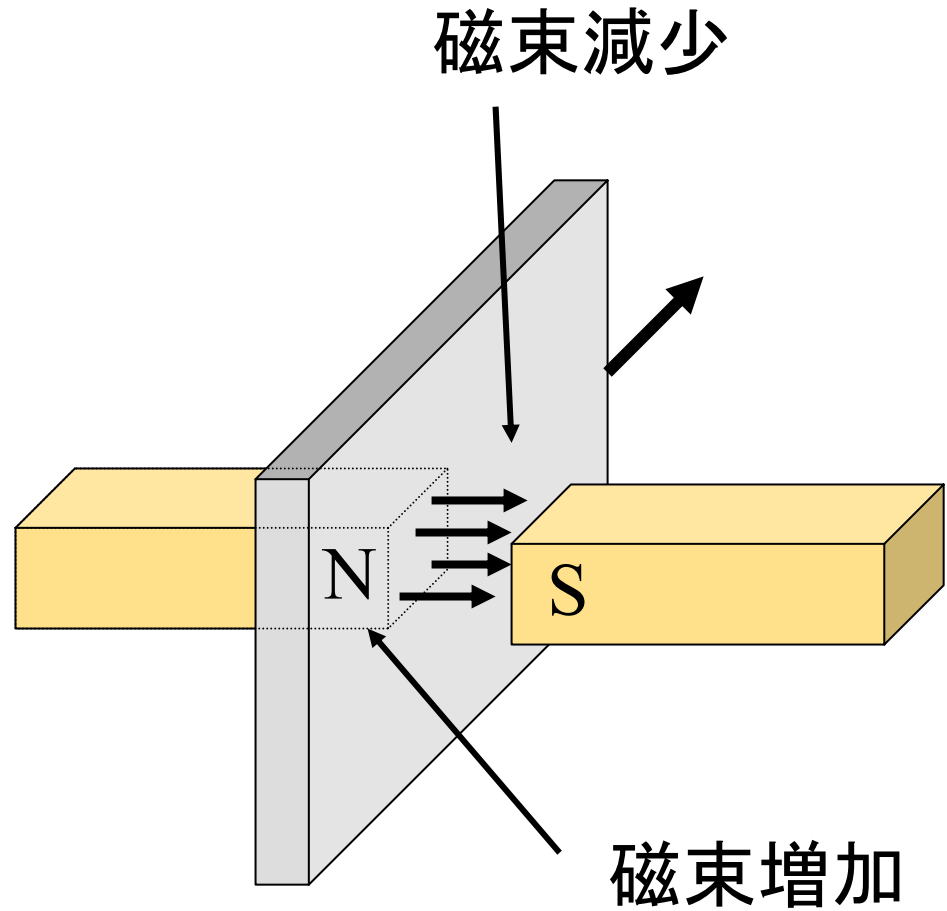
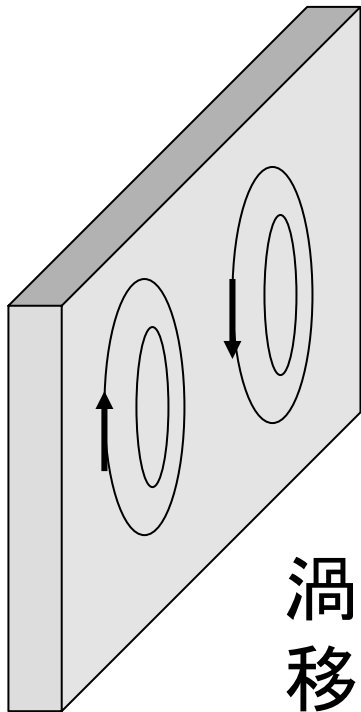
この量はコイルと導体の間の距離に左右される

⇒ 渦電流式変位センサ



渦電流ブレーキ

超高速列車の
ブレーキ



渦電流によって金属板の
移動に抵抗が加わる.

(3) 差動変圧器(差動トランス)

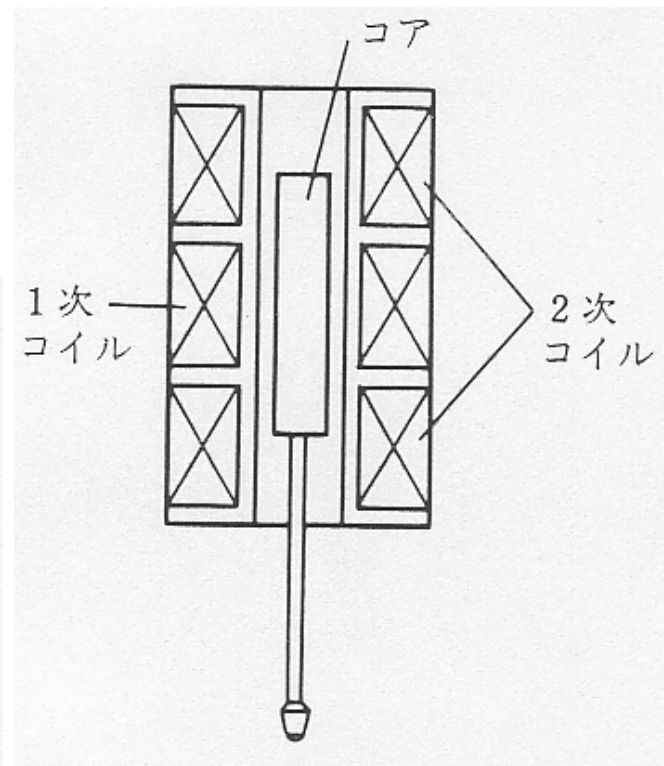
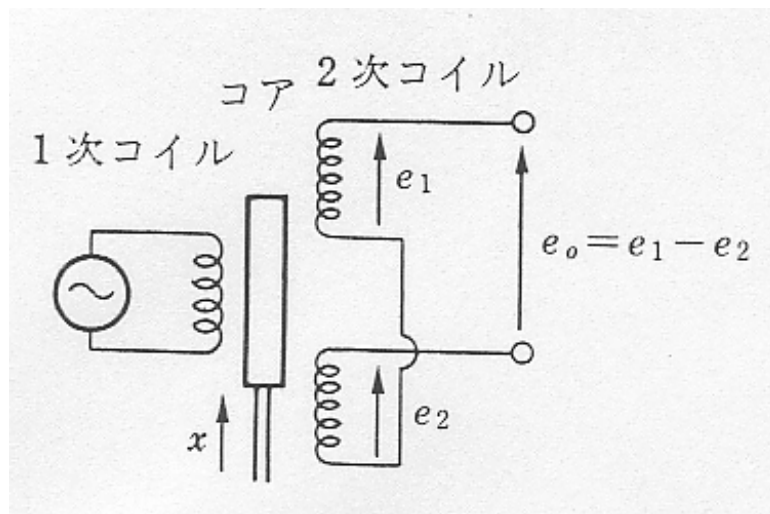
変圧器

$$\frac{\text{2次電圧}}{\text{1次電圧}} = \frac{\text{鉄心のまわりの2次コイルの巻数}}{\text{鉄心のまわりの1次コイルの巻数}}$$

変位 \Rightarrow コイルへの鉄心への侵入量変化
 \Rightarrow 2次誘起電圧変化

差動的結線

$$e_0 = e_1 - e_2$$



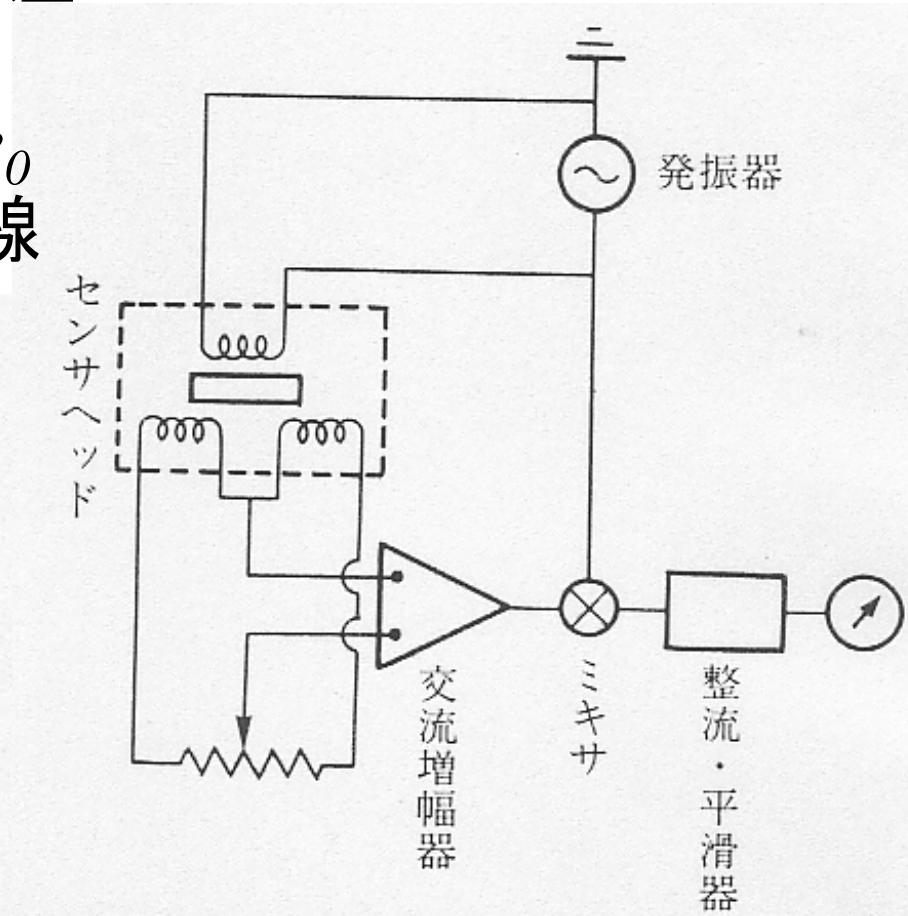
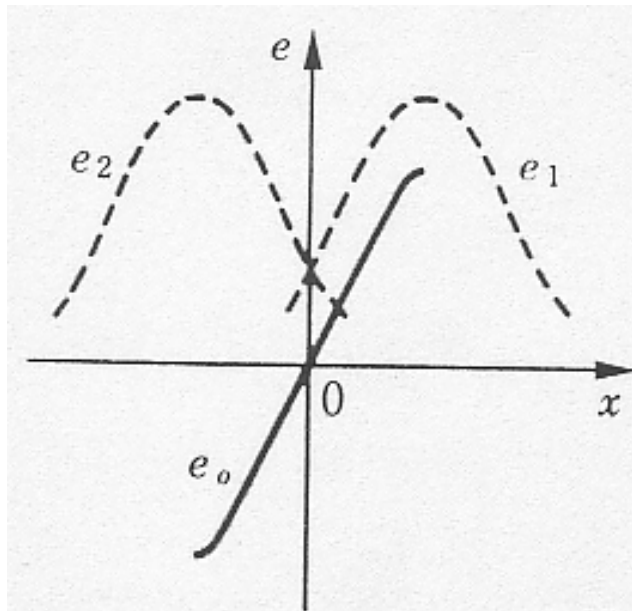
差動変圧器によるセンサ

感度良く, 取扱い容易 ⇒ 数 μm ~ 数 10cm

僅かな非対称性, 渦電流, 漏れ容量

⇒ 2次コイル間に位相差

差動 ⇒ 広い範囲で出力 e_o
と変位 x の関係は直線



電磁誘導

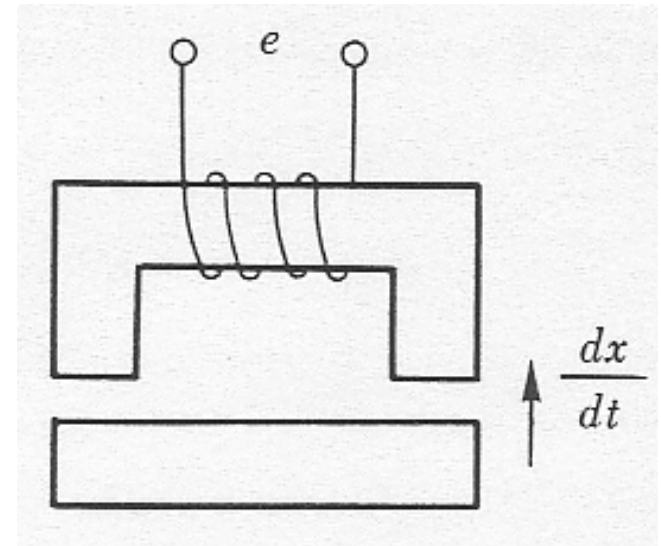
Farady の法則： 誘導起電力

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad \text{コイルの巻数 } n \longrightarrow e = -n\frac{d\phi}{dt}$$

鉄片の移動（接近，遠のき） \Rightarrow 起電力

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} \approx -\frac{\Delta x}{x} \quad \longrightarrow \quad e = -\frac{n\phi}{x} \cdot \frac{dx}{dt}$$

速度，加速度センサ



レゾルバ

$$E_{r1} = E_{s1} \cos \theta + E_{s2} \sin \theta, \quad E_{r2} = E_{s1} \sin \theta + E_{s2} \cos \theta$$

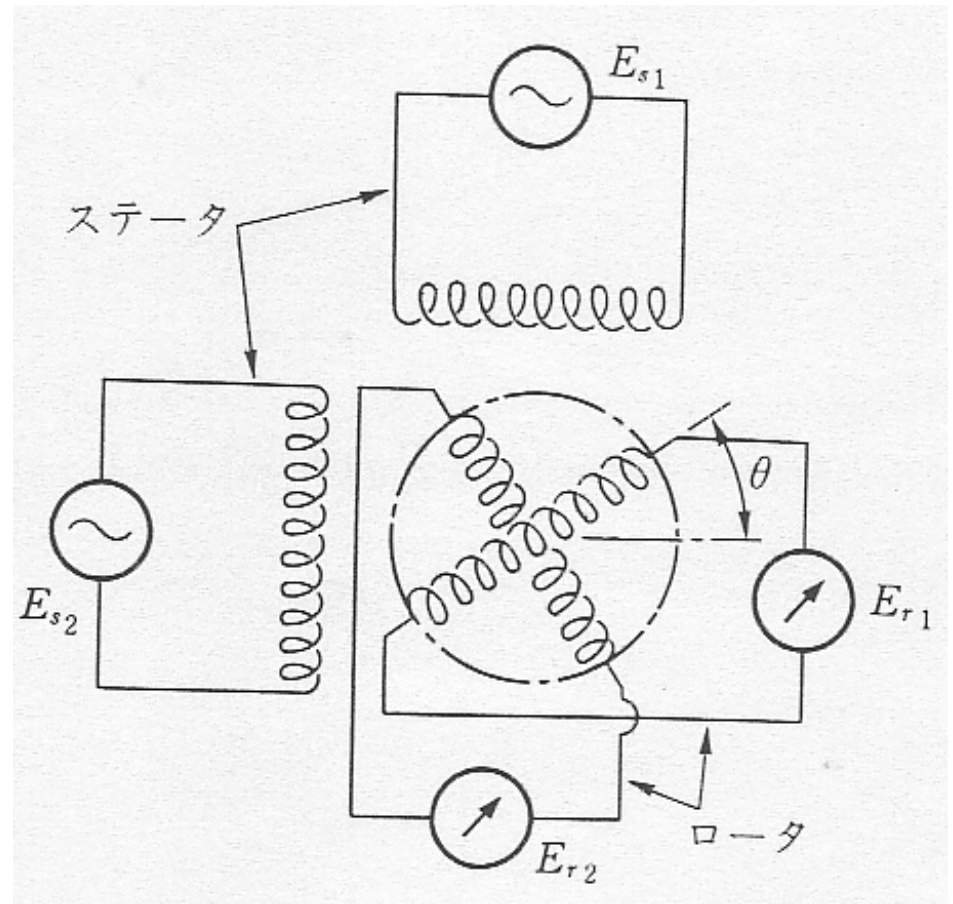
ロータの角度変位 \propto 位相 (交流電圧)

分解能 = 1/3500 rev.

ノイズに左右されない

悪条件下
(高湿, 低温, 振動)
で使用可能

多極レゾルバ
 \Rightarrow 精度向上



マグネシ

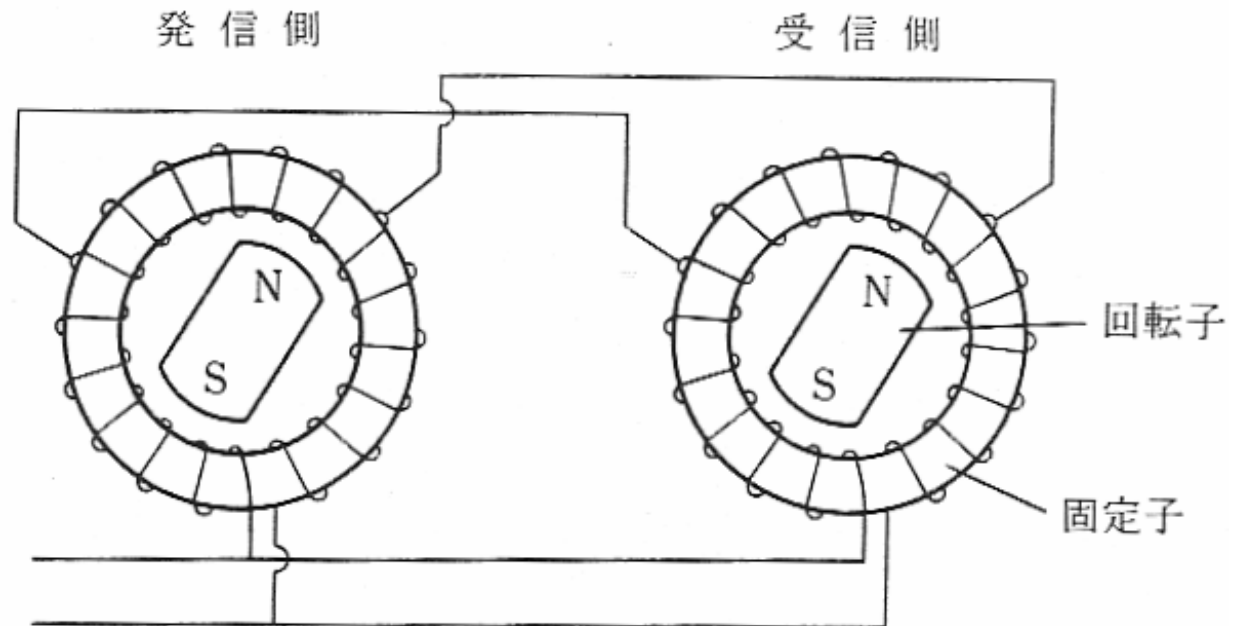
発信側と受信側で同一構造

回転子：永久磁石

固定子：高透磁率材料（パーマロイ）の環状心にコイル

単相励磁の交流磁束（固定子）+ 直流磁束（回転子）

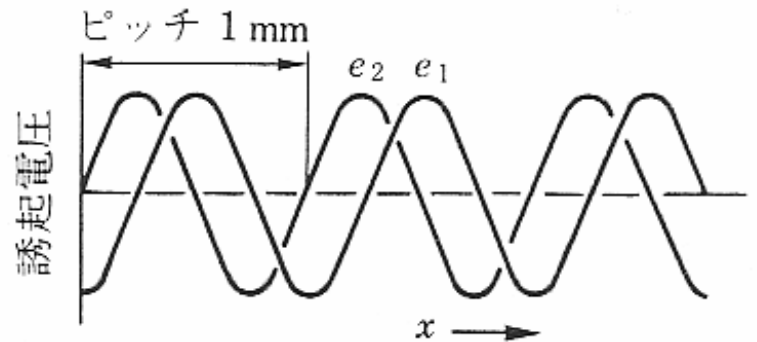
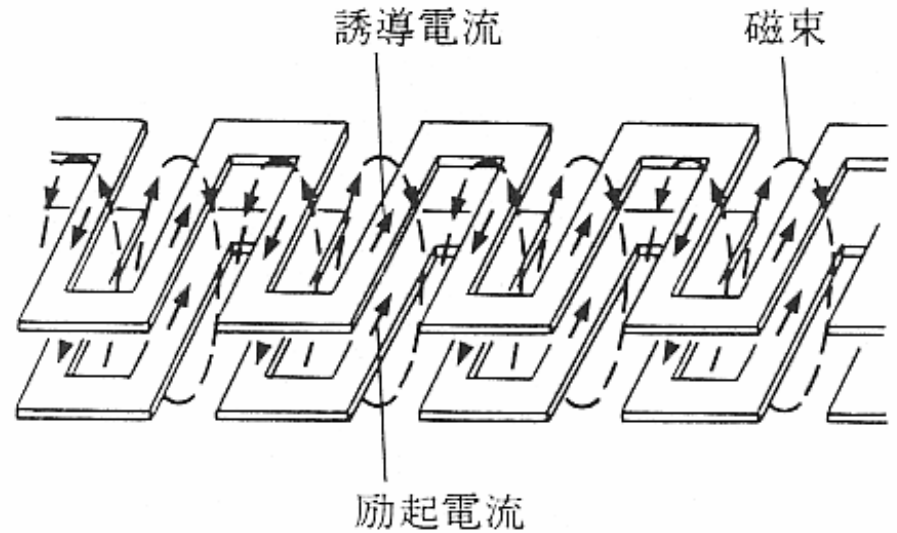
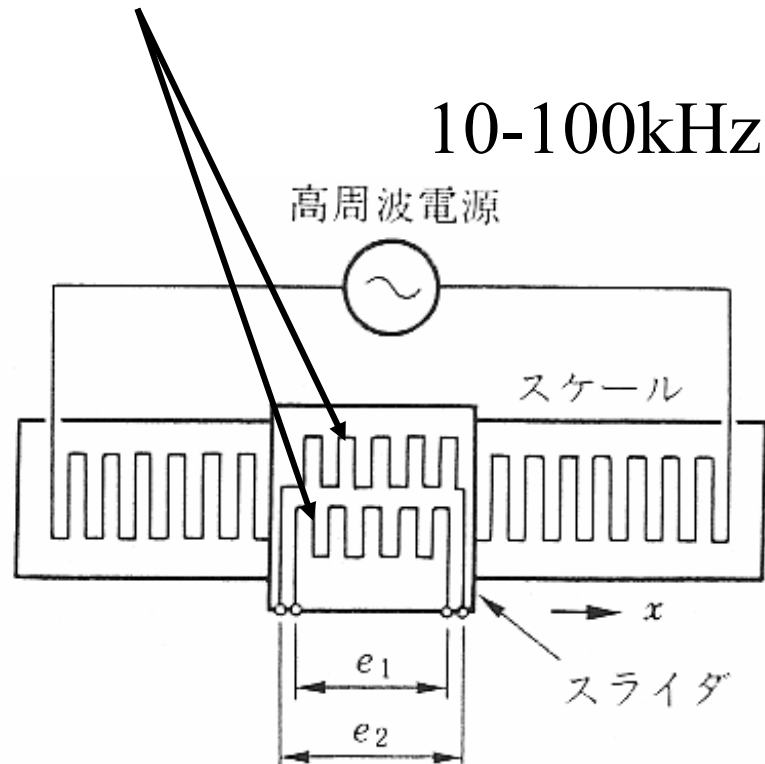
⇒ 第2調波磁束が回転子の位置により変化



インダクトシン

アナログ補間 → 精度 $1 \mu\text{m}$

相互に1/4ピッチずらす



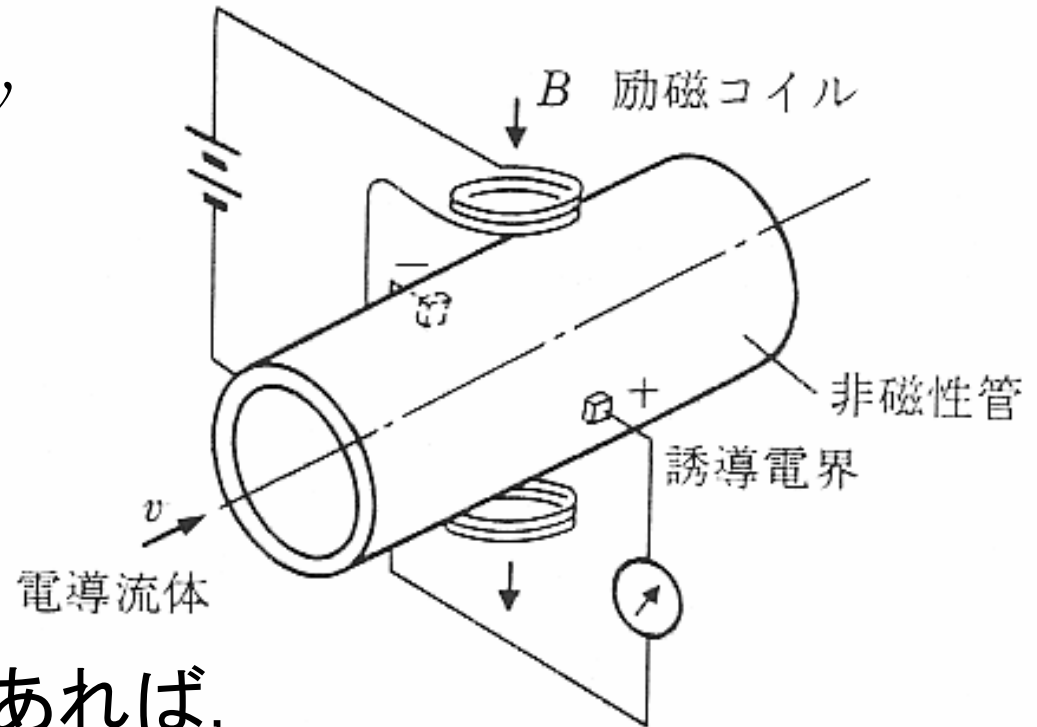
電磁流量計 (magnetic flow meter)

ファラデーの電磁誘導の法則を応用

起電力 $e = kBDv$

流量

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v = \frac{\pi D}{4kB} e$$



特徴

- (1) 流体が導電性であれば、
粘度，混在粒子の影響を受け難い。
- (2) 流れを妨げないので，圧力損失が小さい。
- (3) 体積流量に比例する出力が得られる。