

第1章

信号の物理的エネルギーと情報伝達能力の関係

第2節 システムと物理現象の境界部分の設計

水平分業、MEMS、3Dプリンタ時代の物理情報デバイス

応用システムの設計

電磁場、音場の設計

回路の設計

MEMSの開発、利用

材料の開発、利用

この講義への取り組み方

1. 各聴講者が実現したいシステムの物理的な実現可能性を考察するための実用的なツールを獲得することが目的
2. 必要以上に細かい議論には立ち入らないが、相当程度の精度で評価できるツールでなければ意味がない。
→ 物理的実現性は白黒がつけやすく、第一次のスクリーニングとして有効
3. 学生が勉強する時間は有限であることが前提

情報伝達(通信)、情報取得(センシング)の 限界を決定する要因

= 最善を尽くしても取り除けない不確かさ

(1) 測定対象の物理モデルの不確かさ

(2) 測定値に加算される環境からの不確かな信号

(3) 測定装置内で発生するランダムなノイズ

抵抗型センサで SN 比を上げるにはどうすればよいか

抵抗型センサとは

光、磁場、温度など、測定したいパラメータによって抵抗が変化することを利用するセンサ

抵抗型センサが好まれる理由

センサに流入するエネルギーを増幅して出力する機構を作りやすいため

抵抗型センサの優劣評価(感度評価)指標 S

$$S = \left(\frac{dR}{R} \right) \frac{1}{d\alpha}$$

R : センサの抵抗

α : 計測したい物理量

S の大きいセンサ = 優れた抵抗型センサ

S が指標になる理由

抵抗に与える標準電力を $\frac{E^2}{R} = U$ とし、

「電流一定」で微小電圧変化を計測すると

$$\Delta V = I\Delta R = \frac{\sqrt{U}}{\sqrt{R}} \Delta R$$

$$\Delta V > \text{熱雑音} \iff \sqrt{U} \frac{\Delta R}{R} > \sqrt{4kT\Delta f}$$

〔 右辺 = 一定とすると、 $\Delta R/R$ が大きいほど U は小さくて済む 〕

問い

金属の抵抗は温度 T に比例する。

金属を温度センサとして利用する場合、どのような金属を用いても S は同じ値になることを示せ。

真性半導体サーミスタの感度 S は、金属よりも大きいことを示せ。

真性半導体のキャリア数は温度に対し

$\exp(-E_g/2k_B T)$ のように指数関数的に変化する。

抵抗はキャリア数に反比例するから、抵抗を知ることによって温度を得ることができる。

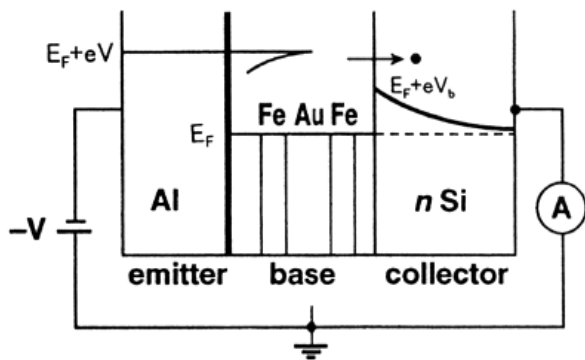
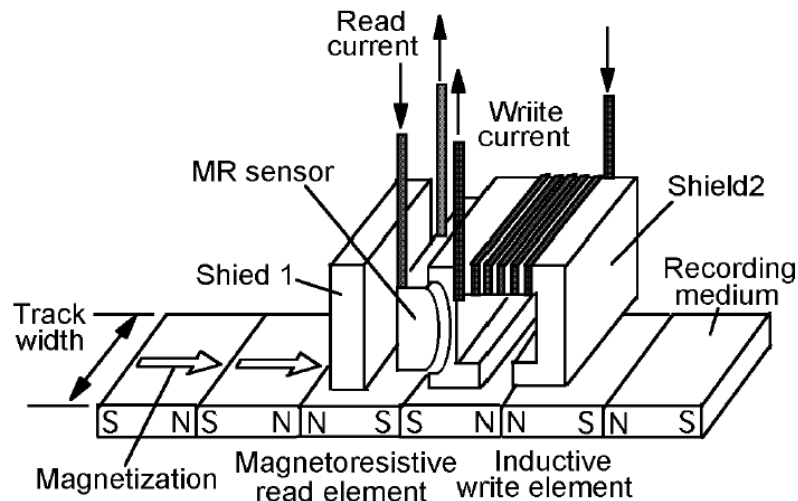
$E_g = 1.9 \times 10^{-19}$ [J]、 $k_B = 1.4 \times 10^{-23}$ [J/K] として、300 K における S はいくらか？

アプリ側からみた温度センシングの重要性

- 製造過程における品質コントロール
(製鉄所から調理まで)
- 装置の動作のコントロール (CPU, HDD, 充電器...)
- 環境温度のコントロール
- 人間状態の計測

抵抗型センサの開発例

MRヘッド



多層薄膜磁気抵抗素子

*トンネリングMRヘッド

2007年のノーベル物理学賞

GMR (giant magnetoresistance effect) 効果の発見

Albert Fert, Peter Grunberg

不確かさの具体例（前回資料の再掲）

(1) 測定対象の物理モデルの不確かさ

揺れる船の上に載った対象の振動を遠方から観測
情報伝達経路のゆらぎ

・例：星のまたたき、環境の反射

電極を取り付けて脳波を測定

(2) 測定値に加算される環境からの不確かな信号

センサ出力に影響する複数パラメータ間の干渉

音声信号に重畳する他の人間、物体からの音声

センサ回路内での信号線間干渉・電源ノイズ

(3) 測定装置内で発生するランダムなノイズ

熱雑音

・ 不可避のノイズ

・ 限界が明快に評価される

- 1) センサ出力に影響する複数パラメータ間の干渉
- 2) 外部の信号源からのノイズ

上記ノイズへの対処法

1. 信号・ノイズパターンに対する先験知識を用いて計算で除去

数学的には、見分けたい複数の信号源それぞれに対して同一でない応答をする観測値ベクトルから特定の信号の状態を決定する逆問題が解ければよい

2. 外来のノイズの多くを物理レベルで除去できる定石的手法を実践

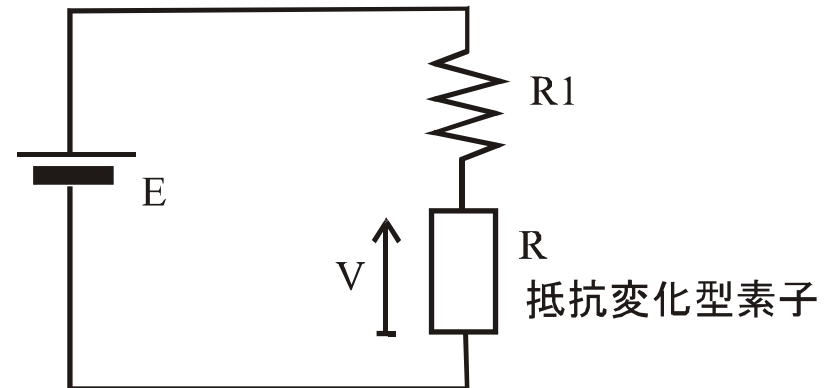
問い0 差動計測

リファレンス信号を探す、作る

図中の抵抗 R は、受光強度 I に対して

$$R = R_0 + \alpha I$$

のように変化する。ところが R の抵抗変化率が数%以内と小さく、それに比べて無視できない不規則変動が電源にあったため、精度のよい測定ができなかった。
どのような対策が考えられるか。



答え

ブリッジを組めばよい。メリットは

1. 電源ノイズを排除できる。
→ どれだけ排除できるか定量的に考察せよ
2. より低い精度・分解能のAD変換器で高い精度の測定ができる。

問い 1 補償構造および差動計測

ある素子の抵抗は、歪と温度の両方に対して変化する。
これを「歪みセンサ」として利用する場合、および「温度センサ」
として利用する場合、その構造にどのような工夫が考えられるか。

〔 クロストーク(複数パラメータ間の干渉)の除去 〕

補助問題:

クロストーク解消の手続きを定式化せよ

答え

ブリッジ回路を組む

温度センサにする場合の留意点

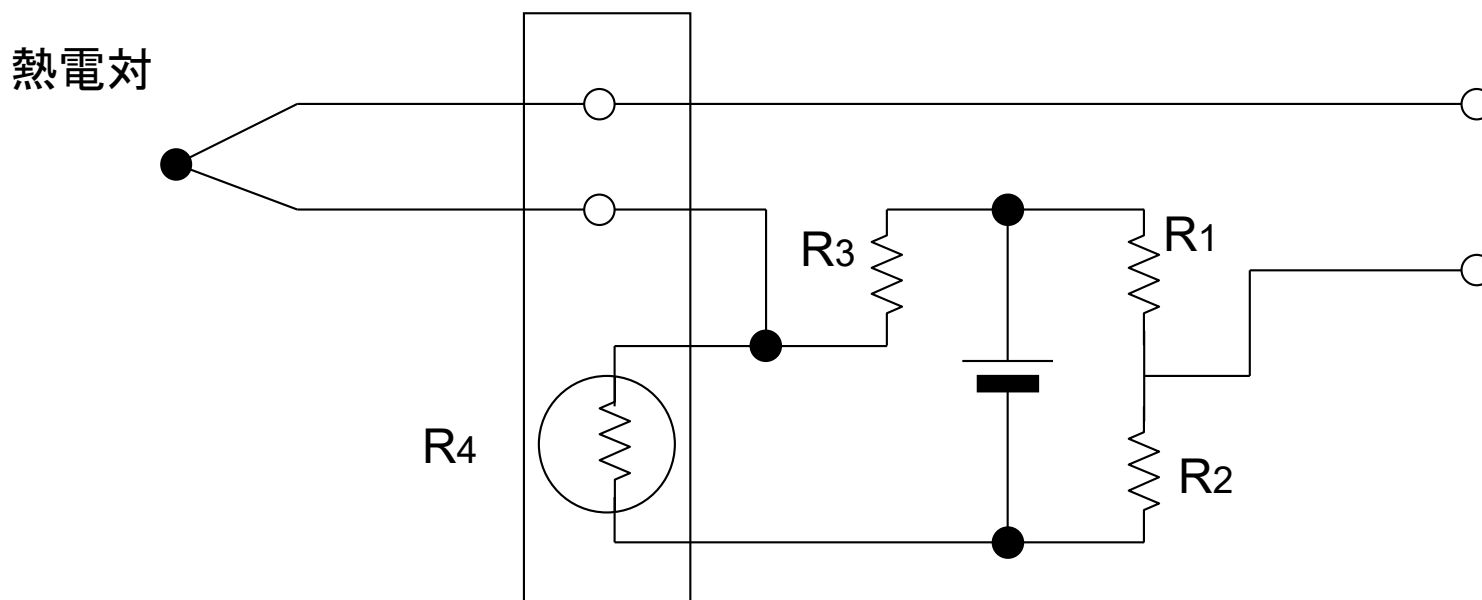
--- 全ての抵抗体を歪まないようにパッケージする

歪みセンサにする場合

--- 全ての抵抗体をなるべく近くに配置する

問い 1a

下図は熱電対の基準接点の温度補償回路を示している。
解説せよ。



答え

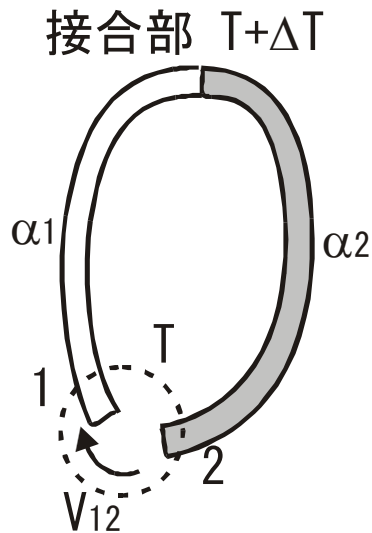
熱電対温度計とは

接合部温度と端部温度の差 ΔT に比例して端部間電圧 V_{12} が生じる熱電効果を利用した温度計測法

端部の温度を基準温度に設定しておけば、 V_{12} の計測値から温度が求められる。

温度補償回路の役割

抵抗の温度変化によるブリッジ電圧変化が、ちょうど熱起電力とつりあうような材料を選択し、基準温度の変化を補償する。

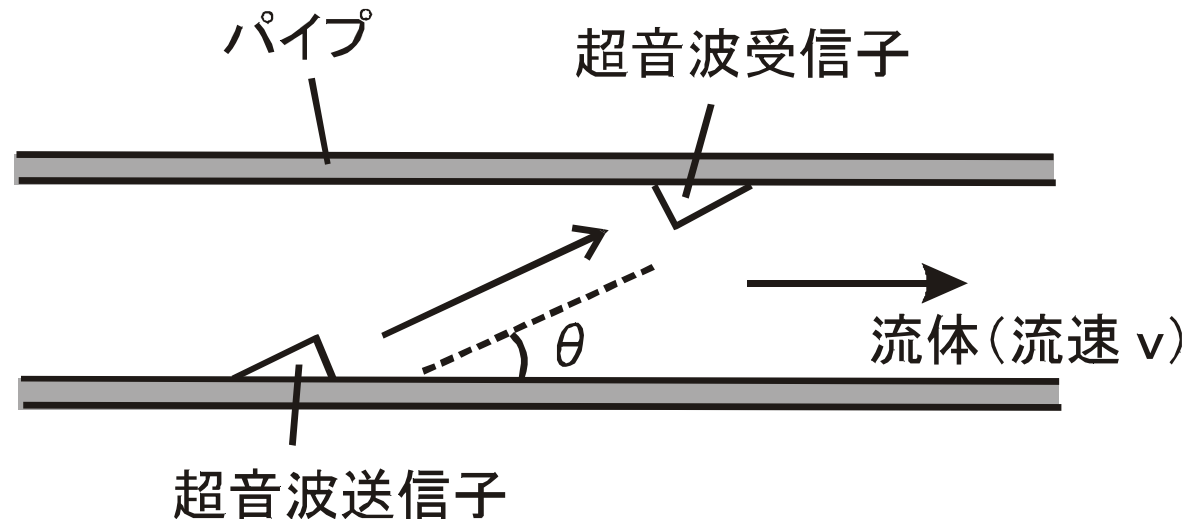


$$V_{12} = (\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T$$

* 究極の性能としては、基準温度を別途測定し、計算で補正した場合と変わらない。

問い 1b

図のようにパイプの中を流れる流体の速度を測るため、管の内部に超音波の送信子と受信子を取り付け、送信子から受信子へ音波が到達する時間を測定する。音速が温度に依存する場合、その影響を取り除くにはどうすればよいか？



答え

静止した流体における音速を $c(T)$ とする。(T : 温度)

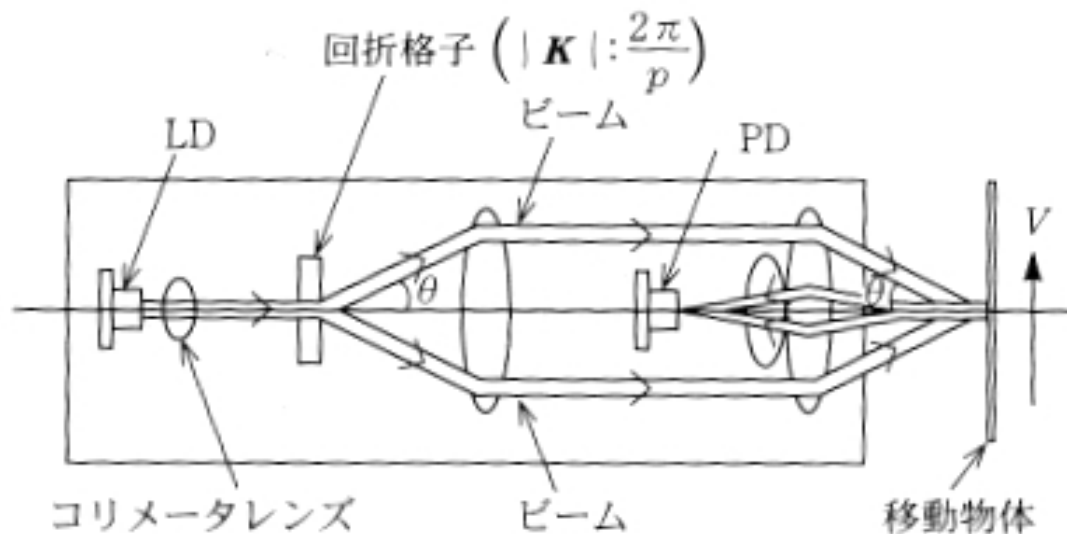
送信子から受信子へパルスが到達するのに要する時間は

$$\tau_1 = \frac{L}{c + v \cos \theta} \quad (\text{L: 送受信子間距離})$$

受信子から送信子へもパルスを送信して伝播時間 τ_2 を測定し、 τ_1 、 τ_2 の逆数の差から v を求めれば T に依存しない計測値が得られる。

問い 1c

下図のドップラ流速計では、温度変化によってレーザーの波長が変化しても測定値が変動しない工夫がなされている。どのような工夫か説明せよ。



答え

散乱光のうち、物体面に平行に進行する成分のみを計測している。
 左上からのビームが散乱した光の周波数

$$f_1 = \frac{c + V \sin \theta}{c} f$$

左下からのビームの散乱光周波数

$$f_2 = \frac{c - V \sin \theta}{c} f$$

ビート周波数(差周波数)

$$f_1 - f_2 = 2V \frac{\sin \theta}{\lambda}$$

ビート周波数が V
 に比例

2本のビームを作るのに、一回折光を使うと、スリットの間隔
 を d として $d \sin \theta = \lambda$ よって

$$f_1 - f_2 = \frac{2V}{d}$$

λ の変動に依存しない計測が可能。

前半部分のまとめ

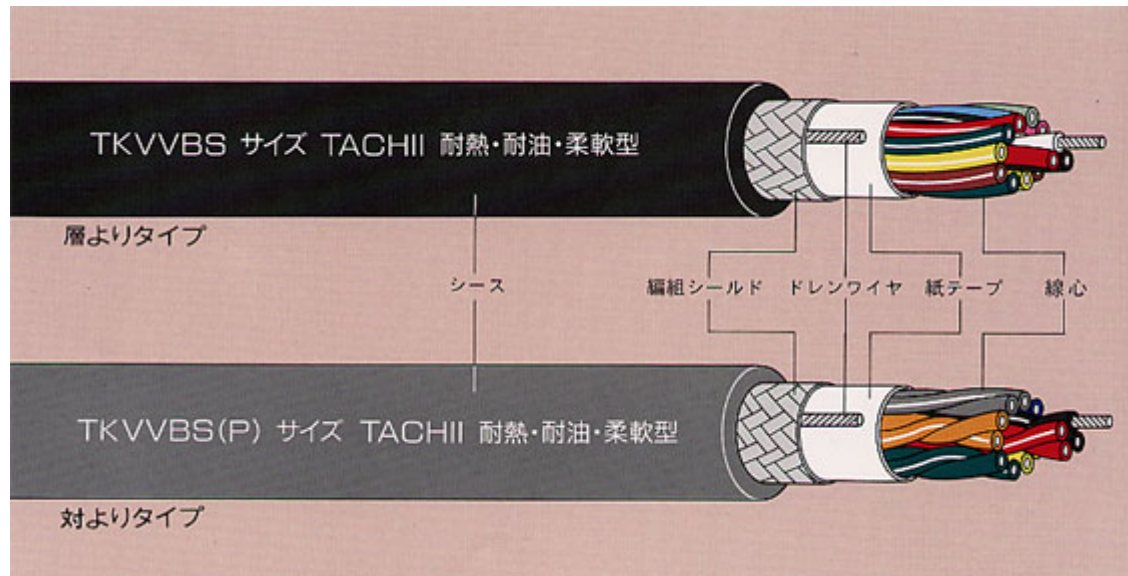
1. 抵抗型センサ素子の能力の指標を確認した
2. 差動計測、補償構造を理解した

ノイズはどこから入るのか

- 1) 電源
- 2) 環境の信号源(回路内の信号源も含む)
 - 電流の行きと帰りを近づける
 - シールドする

* 増幅器のノイズは仕様書で確認

参考：なぜシールド線を使うのか？



<http://www.kanetuu.co.jp/cable/tkvvbs.html> より転載

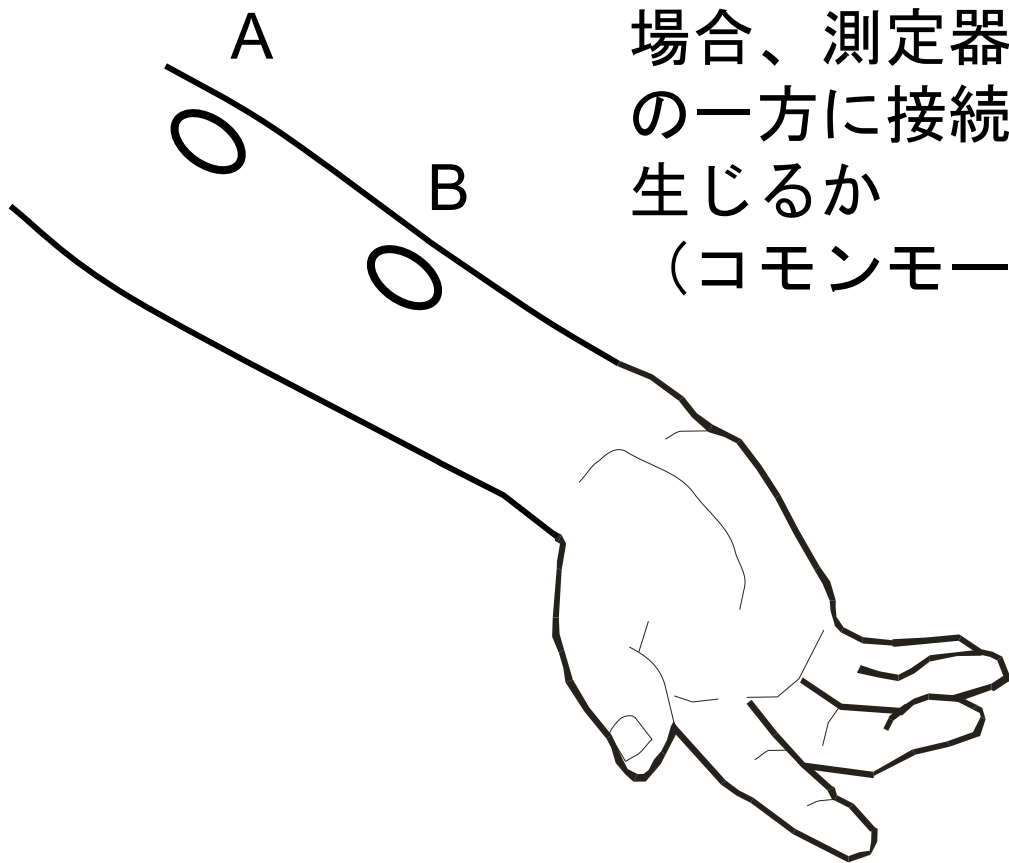
問い： より線にする効果は？

問い 2a 差動計測 2

シールド線を使ってもダメ？

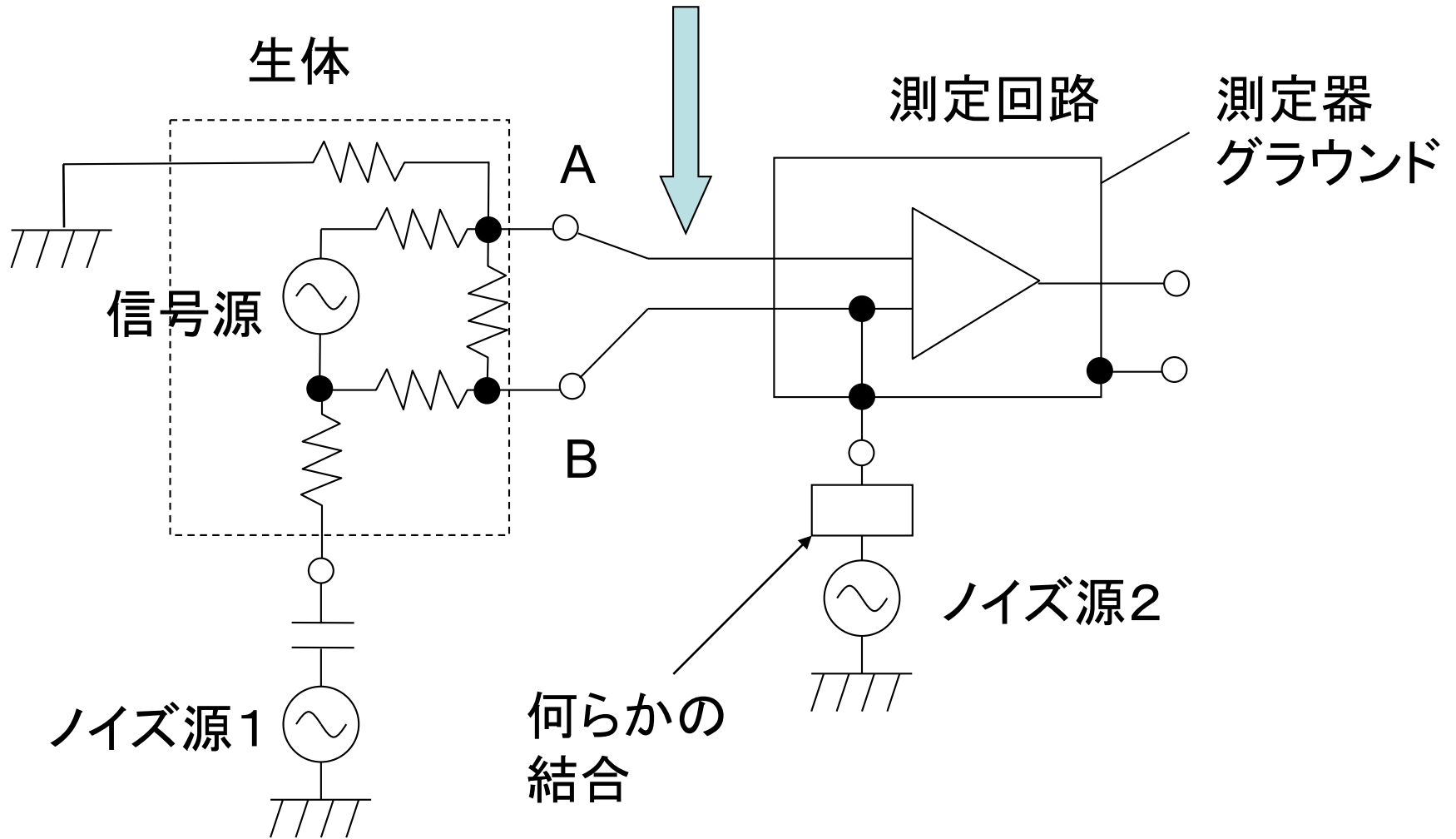
点Aおよび点Bの間の筋電を測定する場合、測定器のグラウンドをAまたはBの一方に接続するとどのような問題が生じるか

(コモンモードノイズ)



答え

このケーブルをいくらシールドしても関係ない



着眼点： 等価回路で考えよう

物理現象を正しく想像し、解析できるようになるには

1. 等価回路で考える

- ・分布定数回路も局所的には集中定数回路
- ・分布定数系であっても、そこから引き出した2端子は、等価電源回路の出力でしかない。
(電源電圧だけでなく出カインピーダンスにも注目)

2. 代表的な微分方程式(波動方程式、拡散方程式)を特徴的なケースについて解き、結果を頭に入れておく
3. 数値計算ソフトを使いこなし、境界条件で場がどのように変化するか、みてる

回路を自在に作ってきちんと動かせる
= 回路図には書いていない容量、誘導結合の存在が
把握できる

現実の回路と回路記号の違いに関する素朴な疑問

Q. 抵抗にはどこにも電荷がたまっていないのに、どうして電位差があるのですか？

電磁気学では電荷が存在しなければ電位差は生じないと学びましたが。

Q. コンデンサの電界は極板間にしか存在しないのに、どうしてその外側につないだ抵抗線に電流を流せるのですか？

Q. 帯域幅を無限にすると、抵抗には無限大の熱雑音電圧が発生するのですか？

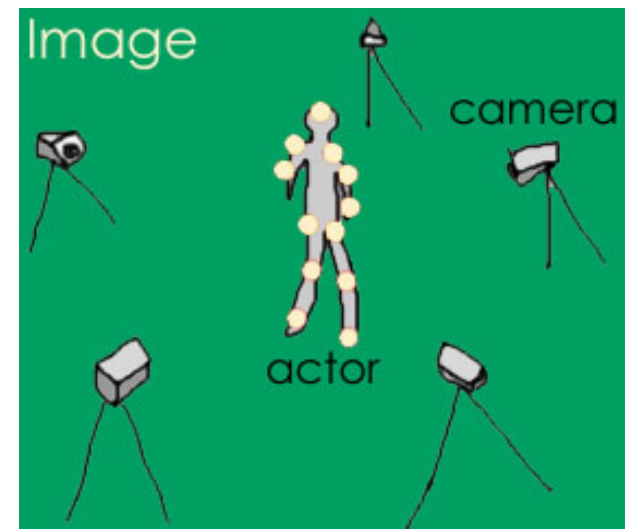
問い 3 ノイズ周波数特性の利用

明るい部屋(太陽光、照明光)で点灯するLEDの光量を精度よく計測する方法を考案せよ。

補題

光学式的位置計測装置では赤外線が好んで用いられるが、それはなぜか？

例) モーションキャプチャシステム



答え

太陽光、照明光変動と相関のない波形で駆動し、その波形と平行な成分のみ計測する。

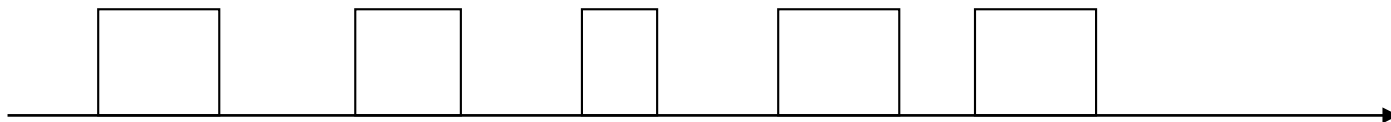
狭帯域の光学フィルタを使用する。

補題の答え

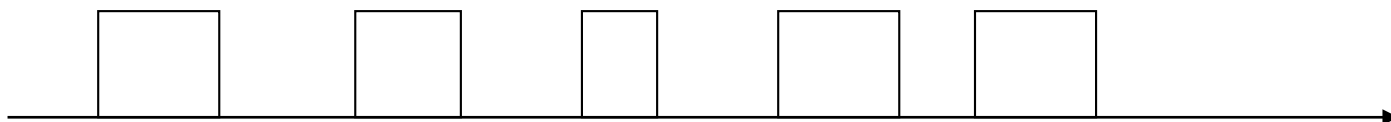
1. 人間に見えない方が都合がよい場合に赤外線を用いる
2. 人間が暮らす一般環境では、赤外線帯域の方が環境光強度が小さいことが多い

ロックイン計測(乗算検波、ホモダイン検波)

変調信号



時間窓



* 必ずしも正弦波である必要はない

ロックイン計測が行っていること

- ・既知の波形 $f(t) = A\phi(t)$ の振幅 A の計測

$$A = \int f(t)\phi(t)dt \quad \left(\text{ただし } \int |\phi|^2 dt = 1 \quad \text{として} \right)$$

信号に乗算する参照信号がノイズを含む場合の対策
(回路内のノイズ、干渉計測等により)

————→ 「ヘテロダイン計測」を覚えておく

ヘテロダイン検波 --- ノイズの周波数特性の利用

変調信号とは異なる周波数の参照信号を乗算し、
差周波数成分を取り出す検波法

ホモダイン検波よりも優れている点

被測定信号ノイズの直流付近成分と
参照信号ノイズの直流付近成分との積が混入しない
(高調波成分同士の積も混入しない*)

* 100 MHz の変調信号に対し 101 MHz の参照信号を乗算し、
バンドパスフィルタの中心周波数を 1 MHz に設定した場合、
200 MHz 成分と 202 MHz 成分の乗算結果はそのフィルタを通過
できない。

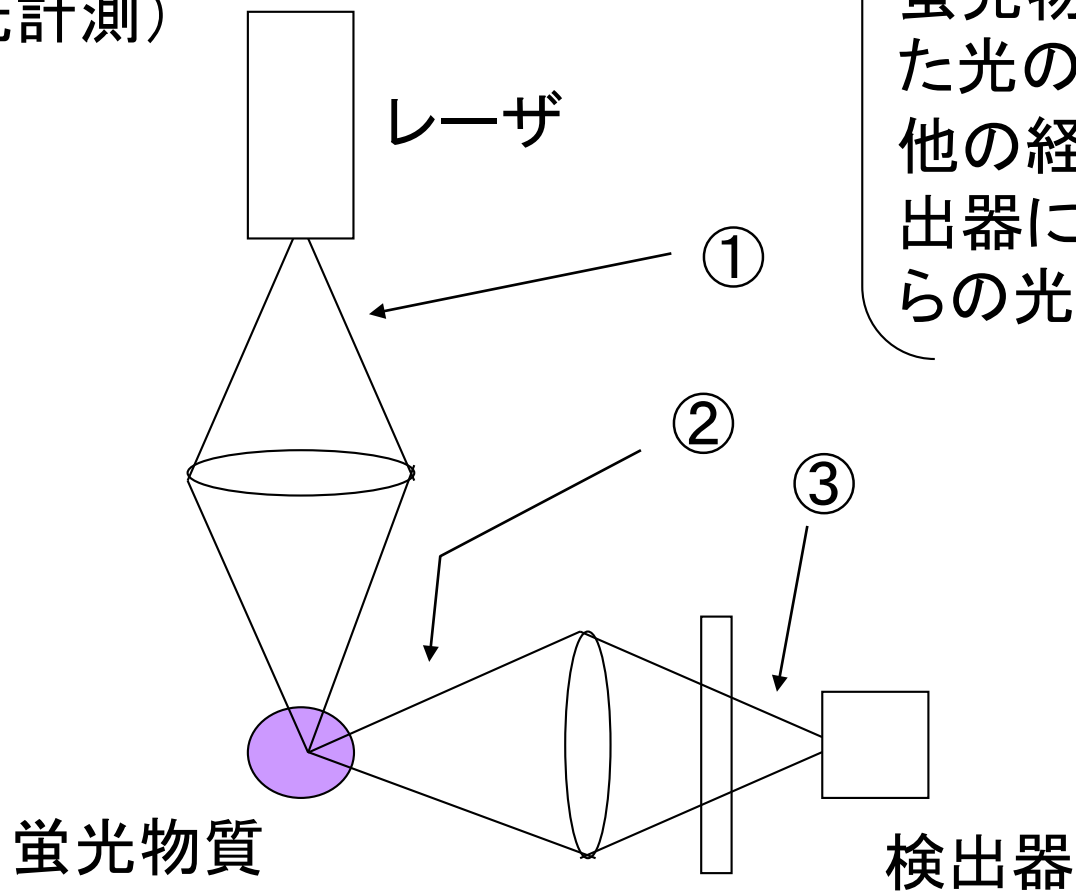
干渉計測の場合、参照光をうんと強くして測定できる。

ただし差周波数が、光源および被測定物の変動周波数より十分高い
周波数になるよう、設定する。

〔 時間領域で積をとる \longleftrightarrow 周波数領域で畳みこむ 〕

問い 3a どこでチョッピングするべきか？

(蛍光計測)

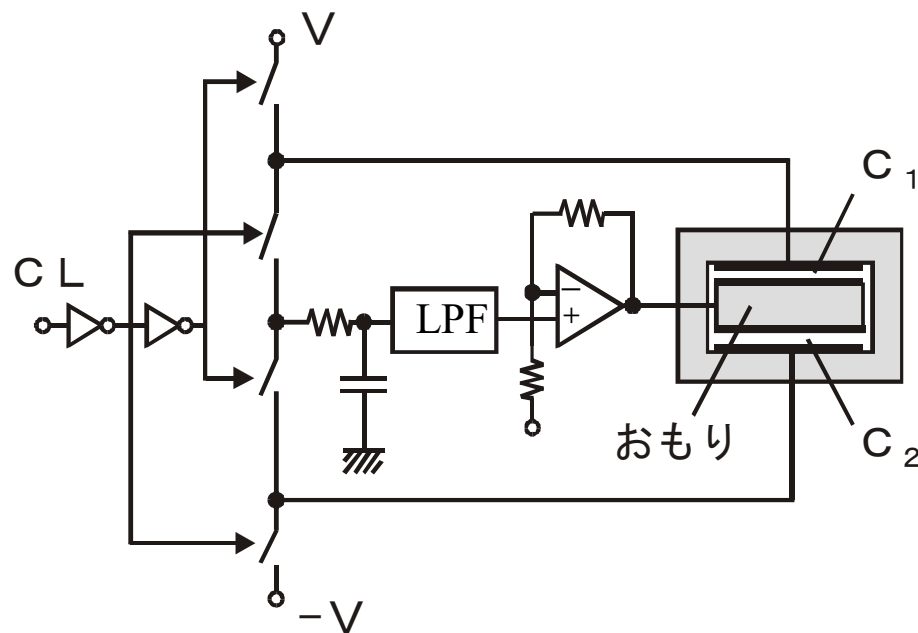
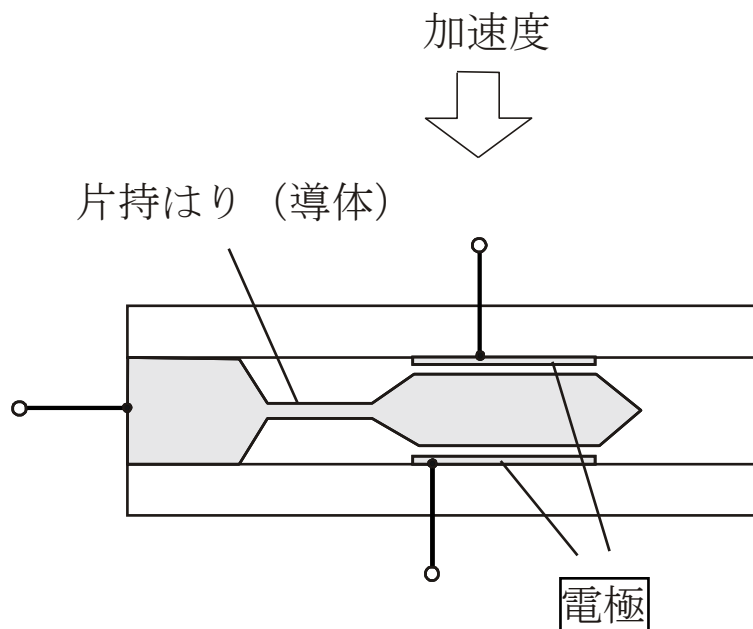


蛍光物質から放出された光のみを検出したい。他の経路を伝搬して検出器に入る光や環境からの光を排除したい。

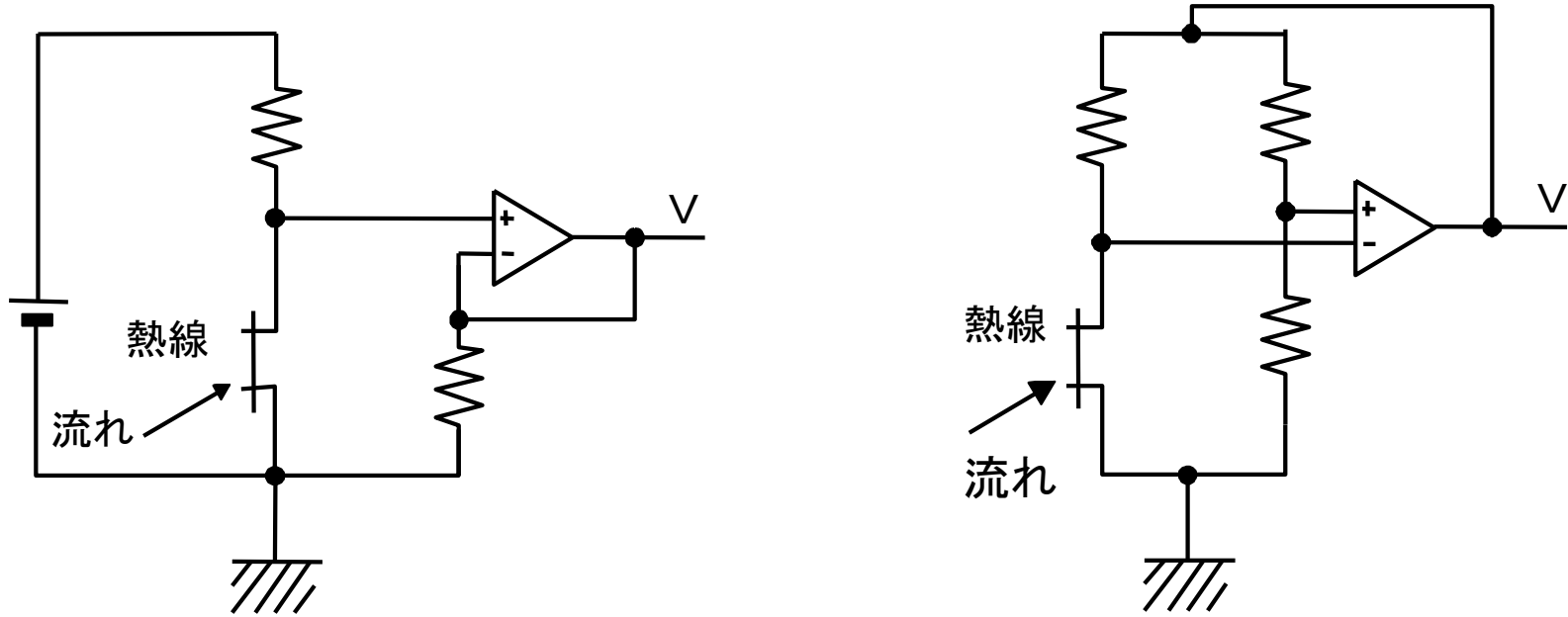
問い 4 零位法・フィードバックの利用

(「ノイズ除去」ではないが、関連事項として紹介)

下図の加速度センサの計測原理を説明せよ。
測定レンジを広げるためにどのような工夫が考えられるか。



下の2種類の熱線流速センサの時間的応答を比較せよ。



○ 熱線から単位時間に流体中に伝達される熱量

$$H = K_1(T_w - T) \left\{ 1 + K_2 \sqrt{v} \right\}$$

v : 流速 T : 流体の温度
 T_w : 熱線温度 K_1, K_2 : 定数

(山崎弘郎, センサ工学の基礎, 昭晃堂, 1985)

○ 熱線の温度は発生熱量 $RI^2 - H$ の時間積分で決まる

答え

右の回路は「熱線を一定温度(一定抵抗値)に保つ」回路

右の計測方法のメリット

- 1) V の瞬時値のみで流速 v が求まる
- 2) 左の回路では、 T_W が小さくなると感度が低下するが、右の回路ではそれが生じない

左の計測方法の問題点

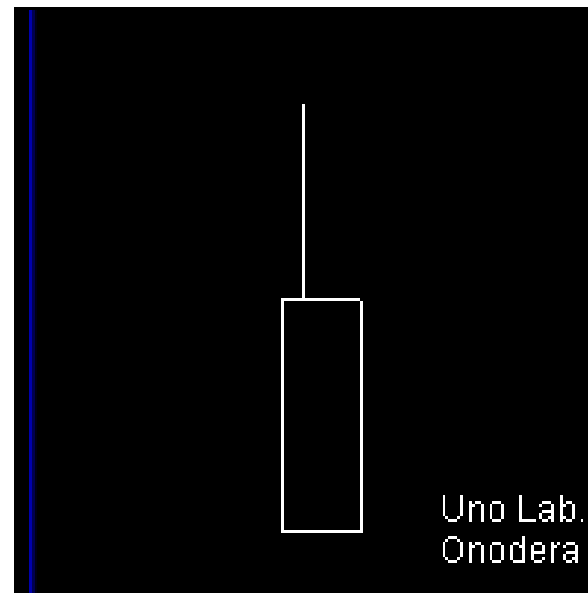
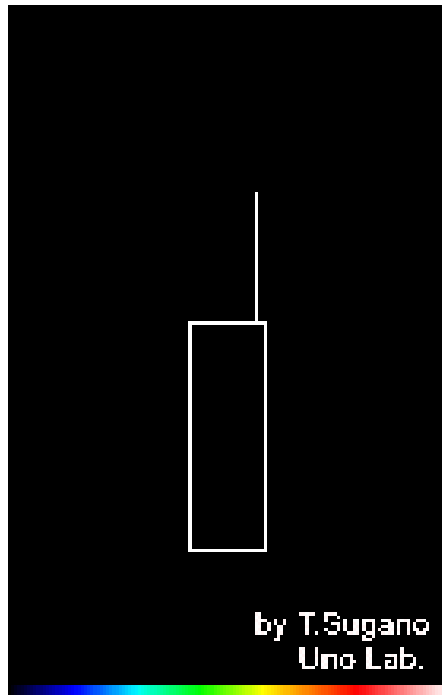
- 1) H の時間積分で熱線の抵抗値がきまるため、
 V の微分 \rightarrow 熱線に流入する電力から H を導出 \rightarrow 熱線の抵抗値から温度 T_W を推定 $\rightarrow v$ を推定
という推定プロセスが必要
- 2) T_W が小さくなると、流速変化が抵抗変化に反映されにくくなる。

〔 * 究極の性能差は 2) の違いによるもの 〕

5 共振現象の利用 ～ 結合を強くする

- [1] 流入電力(送出電力)を増大する
 - [2] 帯域を制限する
 - [3] 高精度計測が実現できる
- } 3つの利用法

例1) アンテナ

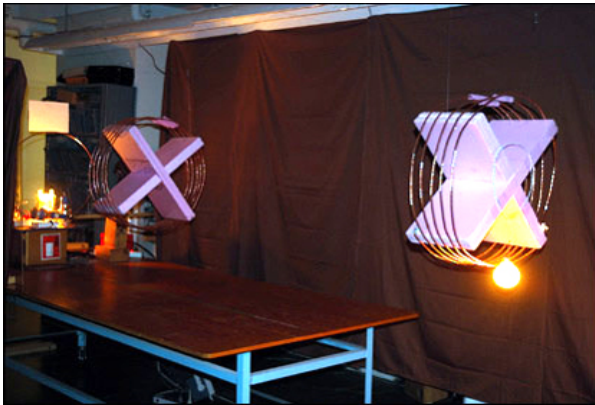


- インピーダンス整合
 - = エネルギー(保存量)の流れの設計
 - * 単なる「回路テクニック」ではない

 - インピーダンスの不整合は共振体によって解消できる
- 損失のないインダクタンス、配線材料があればどんな小さなアンテナも実現できる
- 問題 50オームケーブルとは？

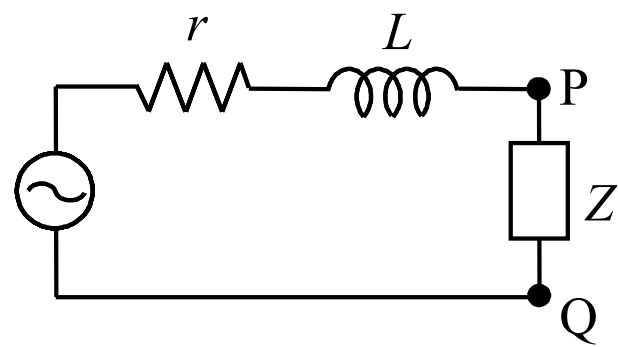
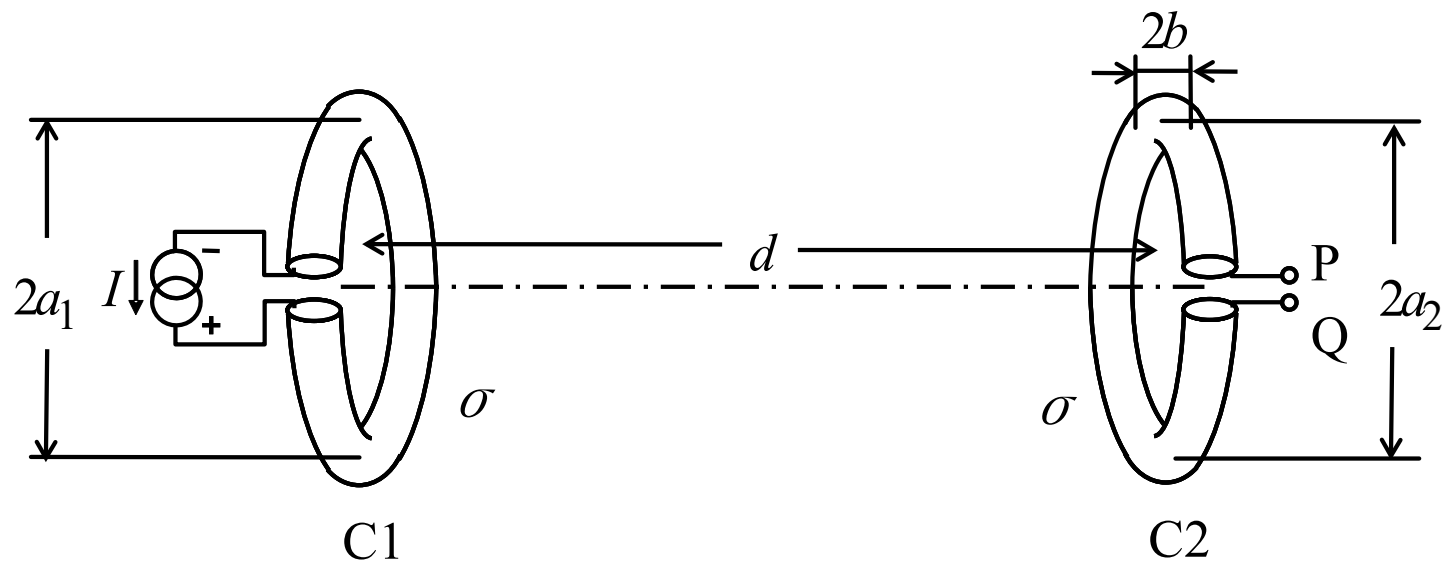


Marin Soljatic の電力伝送 (2007)



対向コイルに
ビオ・サバールの法則を
適用し、銅の導電率における
伝送効率を求めてみよ

$$B(t) = \mu \frac{a_1^2}{2d^3} I(t)$$



共振時の伝送電力

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{|V_{PQ}|^2}{2r} = \frac{1}{8r} \left(\omega\mu \frac{\pi a_2^2 a_1^2 I_0}{2d^3} \right)^2 = \frac{a_2}{64\sigma} \left(\omega\mu \frac{\pi a_1^2 a_2 b I_0}{d^3} \right)^2$$

共振時の電力伝送効率

$$\eta = \frac{W}{(1/2)r'I_0^2 + W'} = \frac{1}{\left(\frac{8\sigma d^3}{\pi\omega\mu(a_1 a_2)^{1.5} b^2} \right)^2 + 2}$$

(σ : 抵抗率)

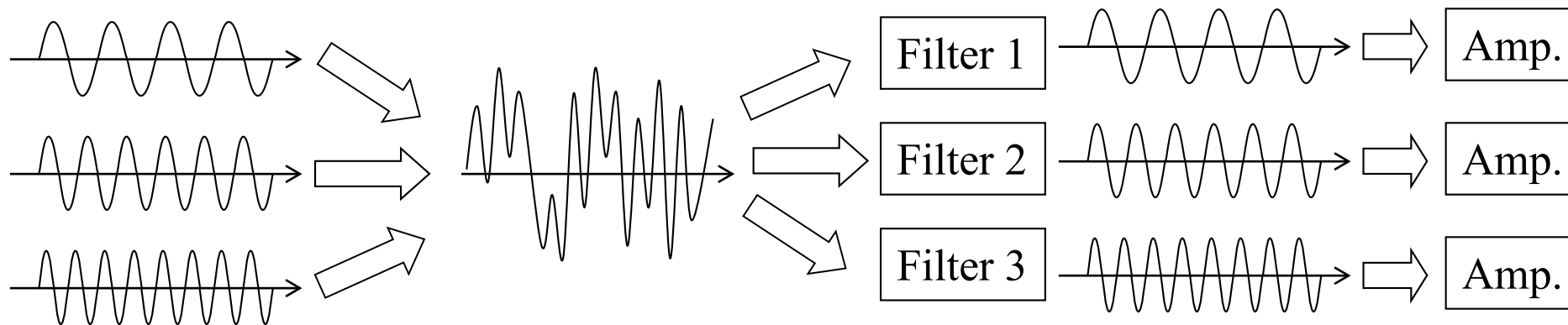
物性を利用したフィルタの利用

○セラミックフィルタ

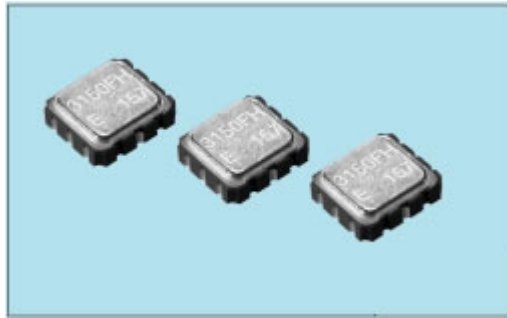
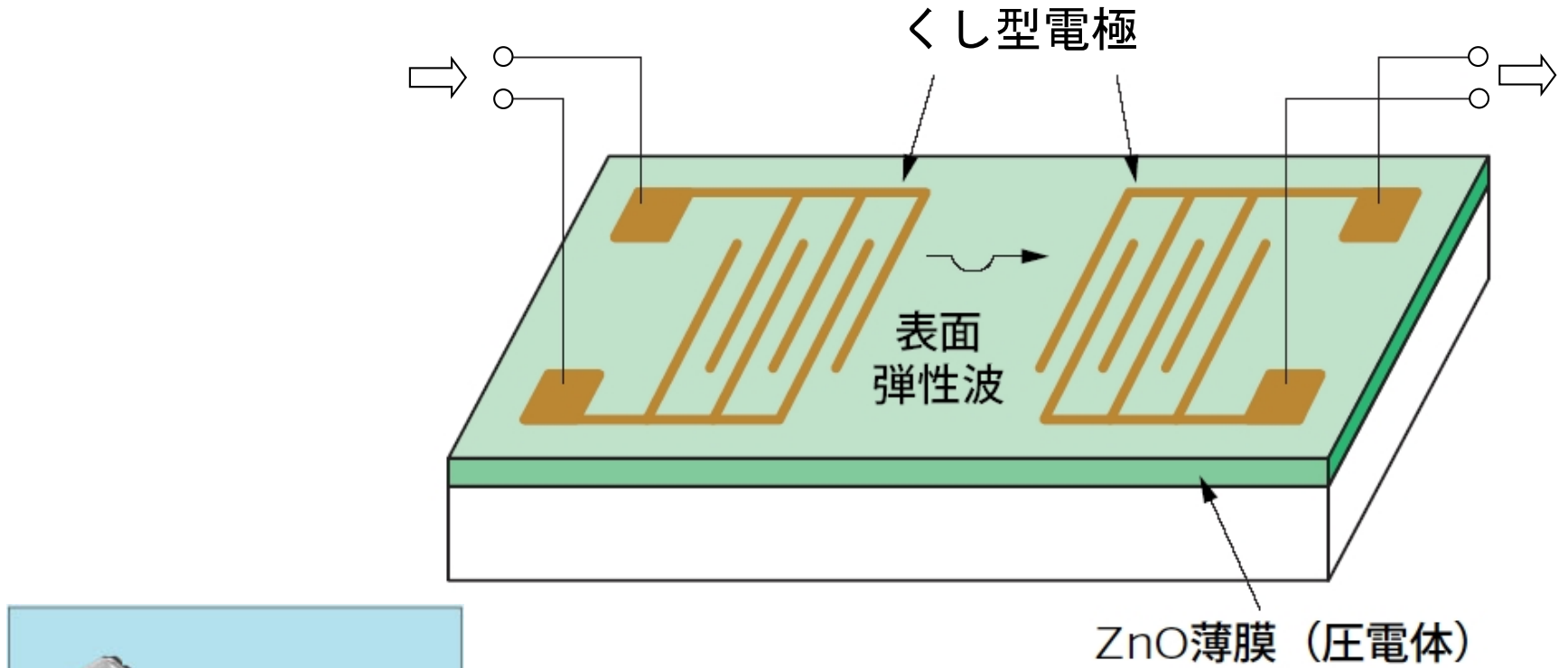
○SAW デバイス

機械的共振体のフィルタ

○MEMS 共振体



SAWデバイス



パッケージサイズ : 4.8×5.2×1.5 mm

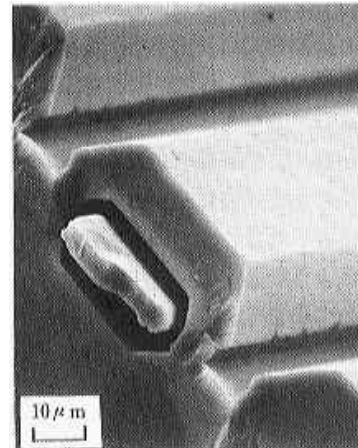
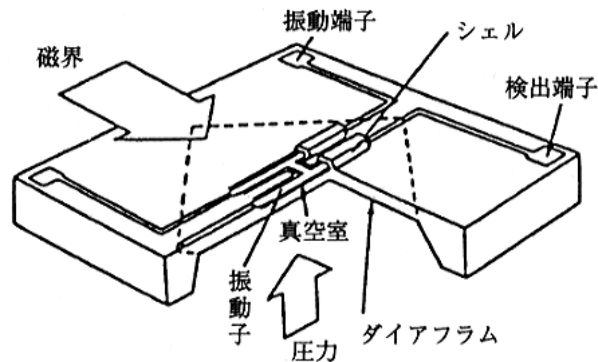
① 時間を計る

水晶振動子、セラミック振動子（温度依存性の小さい切り出し方が可能）

MEMS振動子

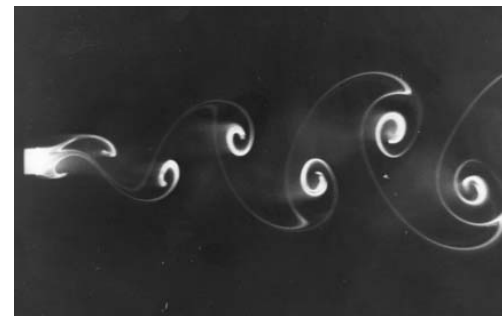
共振周波数変化を観測する質量計測（分解能を考察してみよ）

② 共振型圧力センサ



(池田恭一)

③ その他



カルマン渦流量計(山崎)

共振構造を用いたセンシングのメリット

1. 共振体のQ値が十分に高い場合、その共振周波数はおもに共振体の構造・状態のみによってきまり、(温度の影響を受けやすい)増幅器の増幅率変動等には左右されにくい。
2. センサにエネルギーを蓄積し、高いSN比で信号を計測できる。(センサに選択的にエネルギーを吸収させることができる)
3. インピーダンス整合をとることができる

本節で扱った定石的対処法 まとめ

1. ノイズの非白色性、先験情報の利用
2. 補償構造の利用
3. 差動計測・対称構造の利用
4. 零位法・フィードバックの利用
5. 共振現象の利用