

電気電子計測

ガイダンス

第1回 電気電子計測基本概念 単位系

測定と計測(1)

我々は、日常、**測定**とか**計測**という言葉は何気なく用いているが、これらには違いがある。この違いを明確に意識しておこう

測定

「ある量を、基準として用いる量と比較して、数値または符号を用いて表すこと」 (JIS Z 8103)

未知量

X

基準量

U

$$X = M \cdot U$$

一般に、基準量 U として、単位(Unit)が用いられる

長さの単位メートルの1.5倍で1.5メートル等と表すことに対応

測定と計測(2)

計測

「何らかの**目的を持って**、事物を量的にとらえるための**方法・手段を考究し**、実施し、その**結果を用いる**こと。

(JIS Z 8103)

(1) 目的を明確にすること

(2) そのために、いかなる量を、いかなる方法で測定すればよいかを考えた上で測定を実施すること

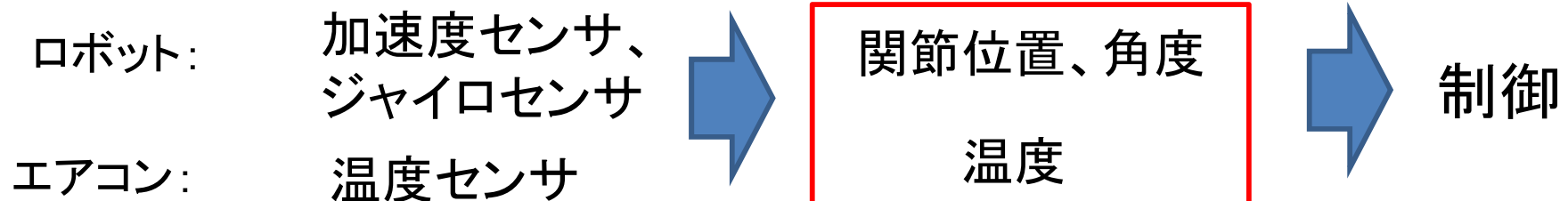
(3) その結果を用いること

計測では、結果を**工学的**に用いることが前提

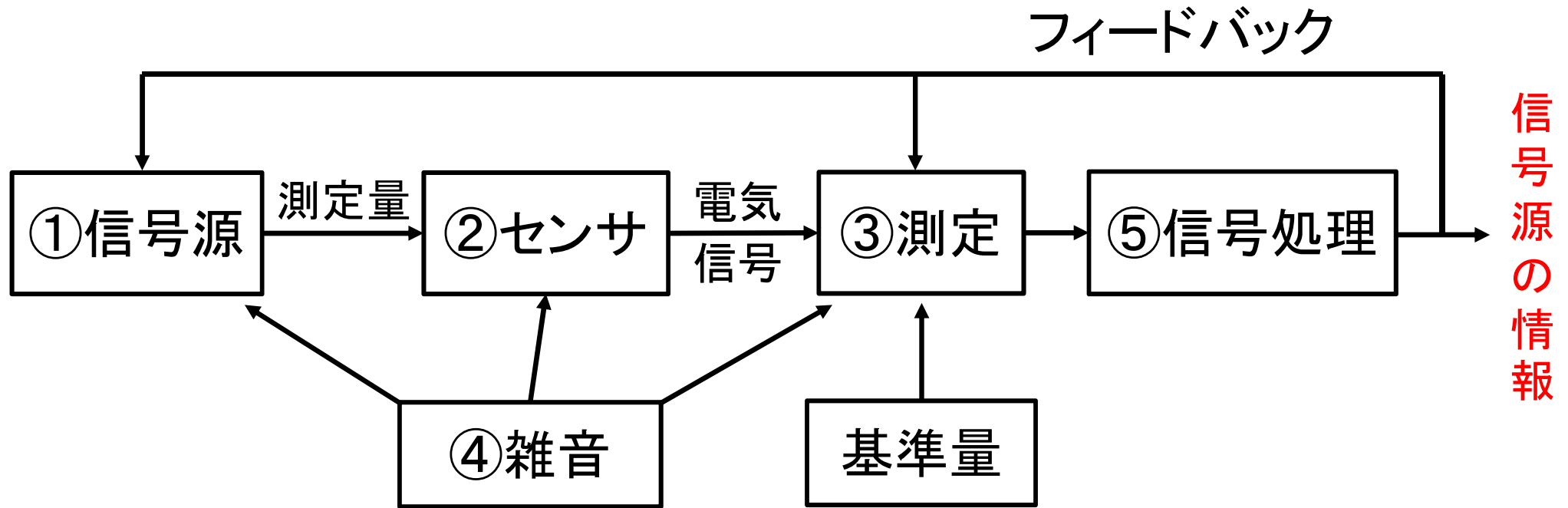
工学とは

人間・社会で利用されるために「どうしたら目指す成果に結び付けられるか」という合目的性を追求

安全性、経済性、運用・保守性といった実用性を重視



計測システムと情報のながれ



信号源の情報

- ①信号源(測定対象) 温度、変位、加速度、圧力、電圧、電流
- ②センサ 信号源を我々の使いやすい電気信号に変換する
- ③測定 電磁気量を測定する
- ④雑音 ①、②、③において混入し、これを前提としてシステムを考える
- ⑤信号処理 電気信号から目的に合った情報を取り出す

計測対象情報を取り出し、変換し、計測者が理解できる形で表示

授業の展開

1. ガイダンス, 電気電子計測基本概念、単位系
2. インピーダンス変化型センサ
3. 起電力型センサ
4. 信号源インピーダンス
5. 信号波形とフーリエ変換
6. 素子の雑音と等価回路
7. 入力インピーダンス、電圧の測定
8. デジタルオシロスコープ、電流電荷の測定
9. 抵抗, インピーダンスの測定
10. 位相差, 周波数の測定
11. 統計的信号パラメータの測定
12. 外部雑音と雑音対策
13. 平滑化とフィルタ

② センサ

① 信号源

④ 雑音

③ 電磁気量の
測定

④ 雑音

⑤ 信号処理

シラバス(1)

【授業の概要】

様々な電氣的パラメータを正確に計測する手法は理学の理論検証から、工学的応用にいたるまで多くの分野で必要となる。この授業ではこれまで学んできた電気回路、電磁気、電子回路理論を用いて物理量を計測するための普遍的な原理、原則や、電子機器により外界の情報をセンシングする際の問題点や対策等、電気電子に関連するパラメータの計測技術についての広範な知識を身に付ける。

【到達度目標】

単位系や様々な電気標準から始まり、電圧、電流、電荷、インピーダンスといった基本物理量の測定の概念や原理について学習し、雑音源や計測誤差についての理解、誤差を低減するための信号処理法の話等、理学的、工学的な側面から理解を深める。

シラバス(2)

【関連講義】

電磁気学Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ 、 電気回路Ⅰ,Ⅱ 、 電子回路Ⅰ,Ⅱ 、 制御工学、
デジタル信号処理、 電気電子工学実験Ⅲ

【教科書】必ずしも必要でない

新版 電気・電子計測 (新妻弘明、中鉢憲賢 著) 朝倉書店

【講義スタイル】

・パワーポイントを用いて説明。講義資料をHPにアップ。

メイン Moodle : 専門教育→理工学部→電子情報理工学科→電気電子計測

サブ 三輪研HP : <http://miwalab.ei.st.gunma-u.ac.jp/index.html>

- ・重要と思う点を自分でメモする。講義資料は板書の補助資料の位置づけ
- ・メモを取りやすいので、各自印刷(1頁に4枚等で)が望ましい
- ・講義資料だけをあとから見直しても内容は理解できない
- ・毎回出席を取り、理解度確認のための小テストを実施

【評価】

- ・出席と、期末テストにより、電気電子計測に対する理解度を評価する
- ・手書きのA4メモ1枚持ち込み可
- ・試験前に出題範囲を説明する

計測にあたっての基本原則

(1)測定目的を明らかにする

何に使うのかが決まれば、何をどれぐらいの**精度**で測定するかが決まる

(2)測定対象をよく知る

測定対象の物理現象や信号の性質をよく理解すれば、
(直流、交流規則信号、不規則信号、信号レベル、周波数帯域等)
測定条件、測定手法を変えることで測定がより**容易**になることはよくある

(3)信号源の質をできるだけ良くする

雑音レベルを下げる、信号レベルを上げる、**信号源のインピーダンスを下げる**

(4)測定の測定対象への影響を十分考慮する

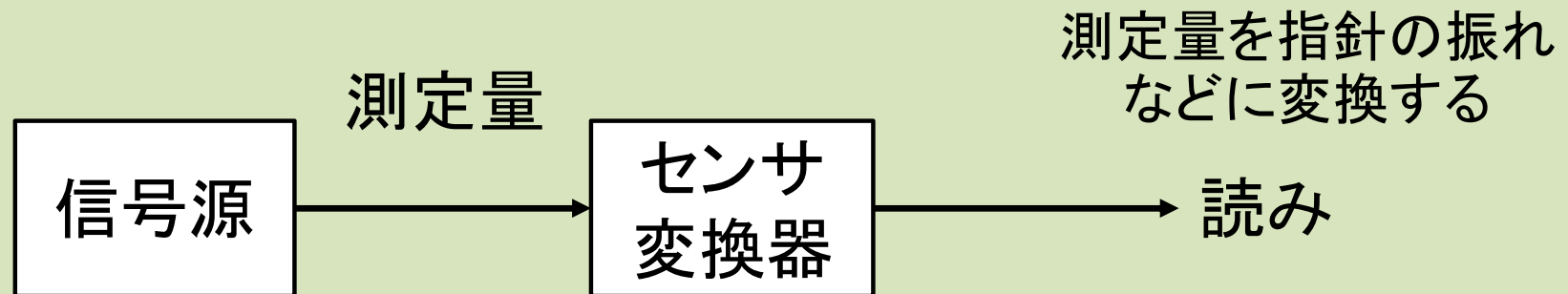
電気信号の測定が**測定対象**へ影響を与える
(電圧計に電流が流れると測定対象の電圧、電磁界が変化する)
→ **測定系の入力インピーダンスを大きくする**

(5)測定目的にあった信号処理と信号源へのフィードバック

測定方式(1)

a. 偏位法

バネばかりのように、測定量を変換器によって指針の振れなどに変換する指示計器(メータ)、オシロスコープなどによる測定



信号の流れは一方向で、開ループ

測定器の指示値を読むだけでよいいため簡潔で高速であるが、測定量の精度を測定器の精度より良くすることはできない

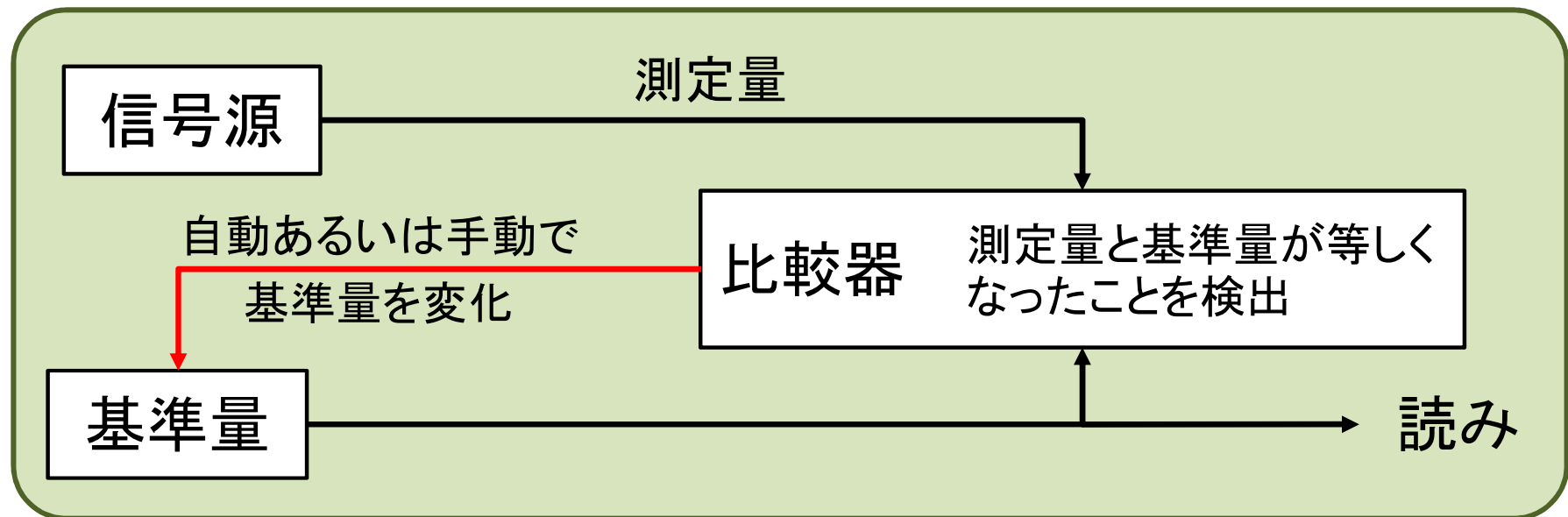
センサの誤差が測定値に直接影響

信号源から変換器等へエネルギーの供給がある

測定方式(2)

b. ゼロ位法

天秤のように、大きさの調整できる既知の基準量と測定量と比較
両者が等しくなったときの基準量の大きさから測定量を知る
(ブリッジ、電位差計等)

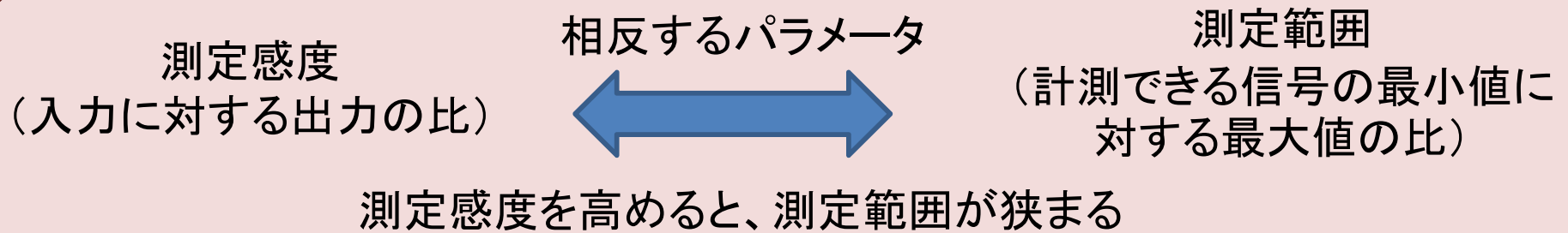


比較の結果を基準量にフィードバックする閉ループ

比較器に誤差があっても、ゼロ検出さえ正確に行われれば、
比較器の測定誤差が測定値に影響しない

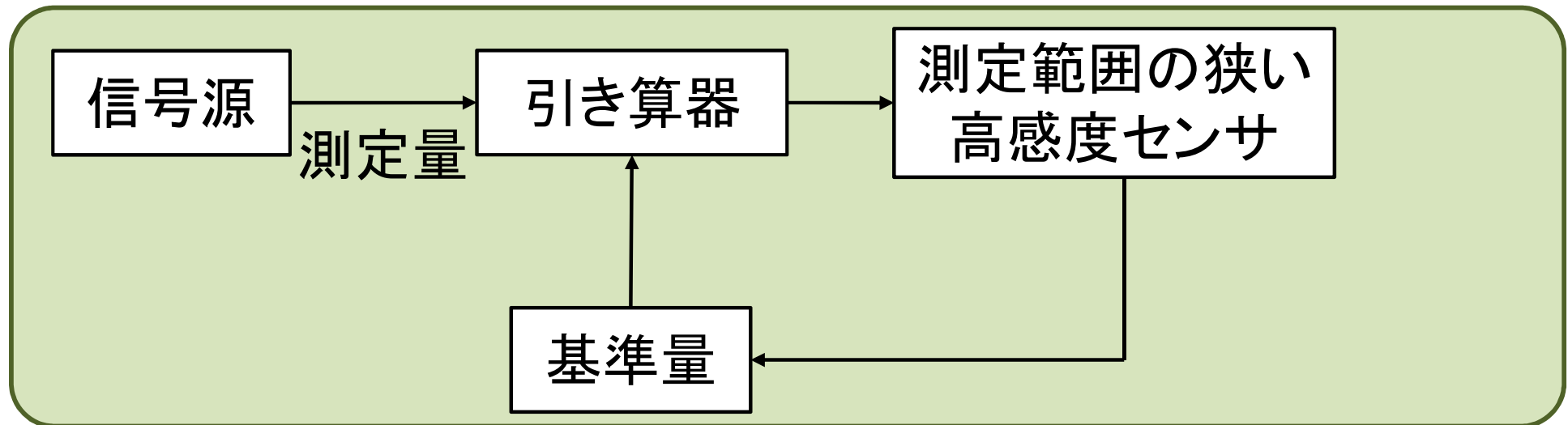
測定量と基準値がバランスすれば測定系へのエネルギー供給なし

測定方式(3)



c. 補償法

ゼロ位法と偏位法を組み合わせ、測定感度と測定範囲を高める手法



測定値から測定量とほぼ等しいある基準量を差し引く

→ 基準量を調節し測定範囲の狭い高感度センサの測定範囲内に

→ 基準量とセンサ出力の両方を読んで測定量を得る

単位系と電気標準(1)

単位は相互に関係を持ったものが多いが、基本となる7つの単位のことを基本単位、その組み合わせによってできる単位を組立単位とよぶ

基本単位(SI単位系)

量	単位	記号	定義
時間	秒	s	^{133}Cs 原子の基底状態の二つの超微細準位の遷移に対応する放射の9192631770周期の継続時間
長さ	メートル	m	光が真空中で $1/299792458$ sの間に進む距離
質量	キログラム	kg	プランク定数の値を正確に $6.62607015 \times 10^{-34}$ J・秒 (= $\text{m}^2 \text{kg} / \text{s}$ と表せる)と定めることによって設定される質量
電流	アンペア	A	電気素量 e を $1.602176634 \times 10^{-19}$ [A・s] の電荷と定めることによって設定される電流
温度	ケルビン	K	ボルツマン定数を 1.380649×10^{-23} J/K (= $\text{m}^2 \text{kg} / \text{s}^2 \text{K}$) とすることによって定まる温度
物質の量	モル	mol	$6.02214076 \times 10^{23}$ (1アボガドロ数)個の要素粒子又は要素粒子の集合体で構成された系の物質量
光度	カンデラ	Cd	周波数 540×10^{12} Hzの単色放射を放出し、所定の方角の放射強度 $1/683 \text{Wsr}^{-1}$ である光源の、その方角における光度

単位系と電気標準(2)

国際単位系(SI)の組み立て単位

量	単位	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
周波数	ヘルツ	Hz		s^{-1}
電気量	クーロン	C	As	sA
電圧、電位	ボルト	V	J/C	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{-2} A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	$kg s^{-2} A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
電界の強さ		V/m		
誘電率		F/m		
透磁率		H/m		
力	ニュートン	N	J/m	$m kg s^{-2}$
エネルギー	ジュール	J	Nm	$m^2 kg s^{-2}$
仕事率	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$

単位系と電気標準(3)

接頭語

名称	記号	大きさ	名称	記号	大きさ
エクサ	E	10^{18}	センチ	c	10^{-2}
ペタ	P	10^{15}	ミリ	m	10^{-3}
テラ	T	10^{12}	マイクロ	μ	10^{-6}
ギガ	G	10^9	ナノ	n	10^{-9}
メガ	M	10^6	ピコ	p	10^{-12}
キロ	k (小文字)	10^3	フェムト	f	10^{-15}

大文字 K は温度の単位ケルビン

第1回復習テスト

1. 計測と測定の違いを端的に述べよ

2. 以下の文章に間違いがあれば、訂正せよ

(a) 信号源の質をよくするには、信号レベルを大きくするだけでよい

(b) 体温計は偏位法による測定方式である

(c) ゼロ位法を用いた電圧測定では測定系へ流れ込む電流を最大にできる点で優れている

(d) 0.1 MHz は 100 KHzである

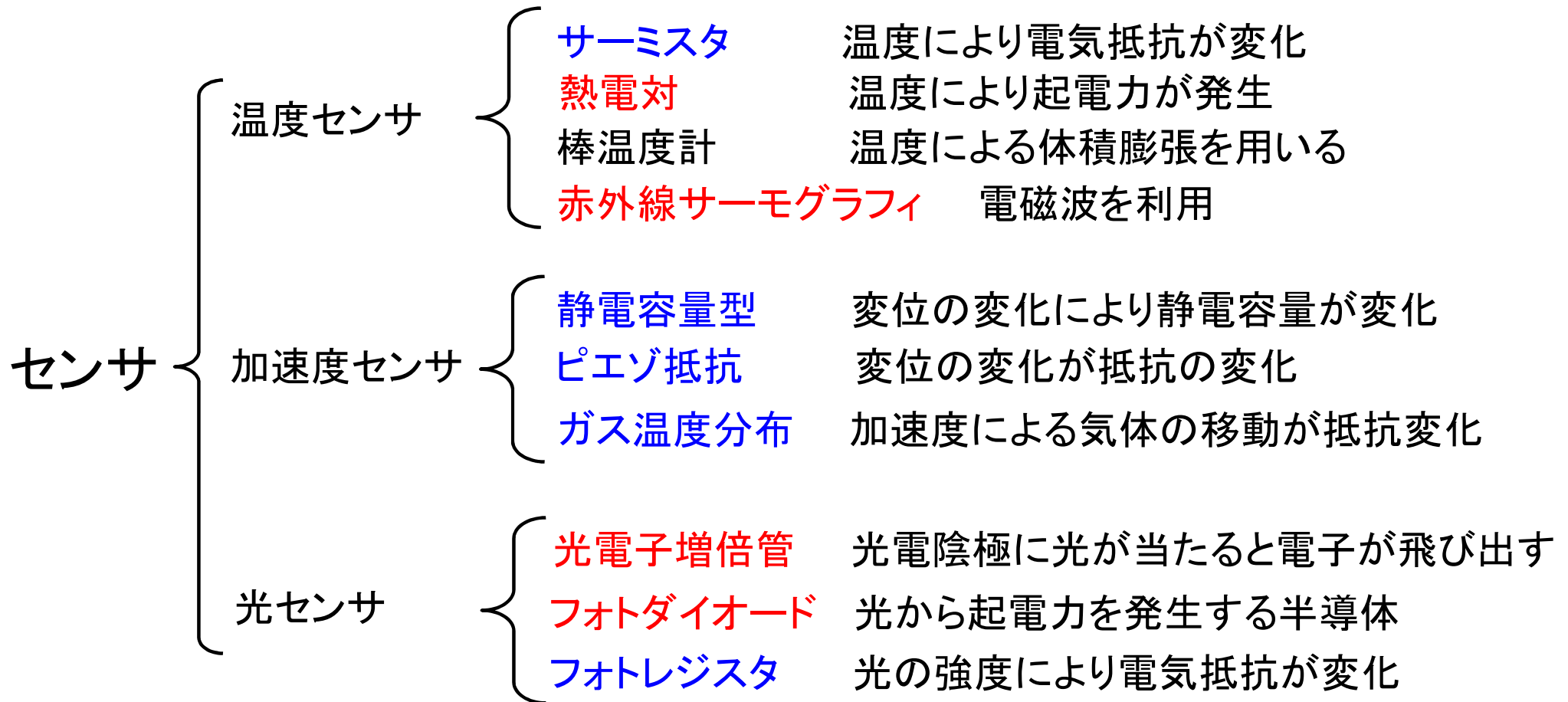
電気電子計測

第2回 インピーダンス変化型センサ

センサ

センサ

測定対象である を に変換する素子
トランスデューサとも呼ばれる

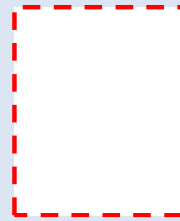


測定物理量により分類すれば、赤は 型、青は 型

抵抗変化型センサ

物体の抵抗値

$R =$



ρ : 物体の抵抗率

l : 電流が流れる方向の長さ

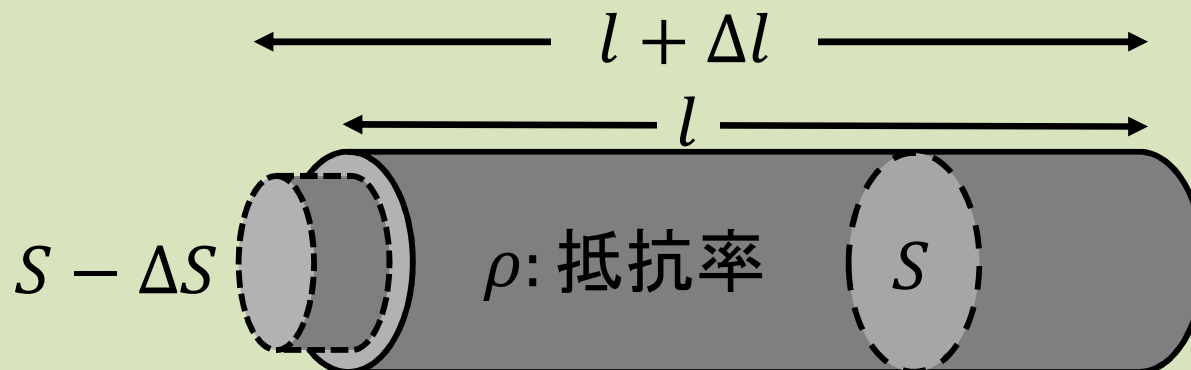
S : 電流と直交する断面の面積

ρ, l, S のうちどれかが、測定しようとする物理量により変化
抵抗値 R はその物理量によって変化
センサとして使用可

a. ひずみセンサ

物体が変形するときの変形の割合を「ひずみ」とよぶ

抵抗線を引っ張ると、その長さは伸び、断面積は小さくなるため、抵抗値は なる



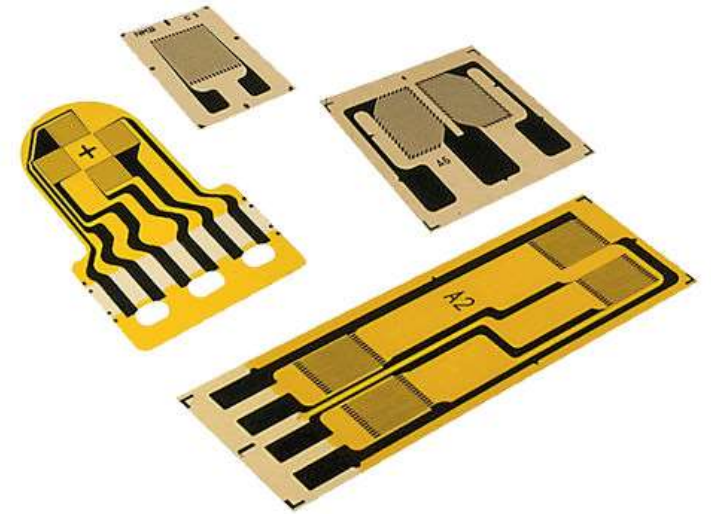
抵抗値

$R' =$



ひずみセンサ

$$\begin{aligned}\Delta R &= R' - R = \rho \frac{l + \Delta l}{S - \Delta S} - \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{S} \left(\frac{S l + \Delta l}{l S - \Delta S} - 1 \right) \\ &= \rho \frac{l}{S} \left(\frac{1 + \frac{\Delta l}{l}}{1 - \frac{\Delta S}{S}} - \frac{1 - \frac{\Delta S}{S}}{1 - \frac{\Delta S}{S}} \right) = \rho \frac{l}{S} \left(\frac{\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S}{S}}{1 - \frac{\Delta S}{S}} \right) \\ &\cong \rho \frac{l}{S} \left(\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S}{S} \right) \quad \because \frac{\Delta S}{S} \ll 1\end{aligned}$$



抵抗線の伸びにより体積が変化しないとすれば、 $lS =$

$\Delta l \Delta S$ を無視すれば $\Delta l S = l \Delta S$ よって $\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta S}{S}$

$\Delta R \cong \rho \frac{2\Delta l}{S} = R \frac{2\Delta l}{l}$ より

抵抗値の変化率は抵抗線のひずみに比例
ストレインゲージ

温度センサ(1)

b. 温度センサ

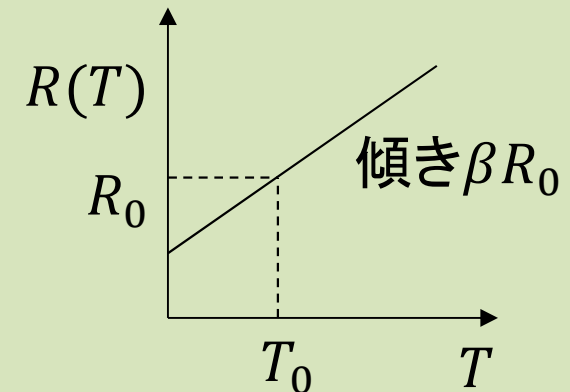
抵抗線は金属内の の動きが電流を妨げ抵抗となる。
 により自由電子の動きが激しくなれば、抵抗率が上昇

熱により、金属は膨張するが、それによる歪は無視できるほど小さい。
熱による抵抗の変化は抵抗率の熱変化に支配

$$R(T) \cong R_0$$

R_0 : 温度 T_0 での抵抗値

β : 温度係数 (一般の金属では $3 \sim 7 \times 10^{-3}$)

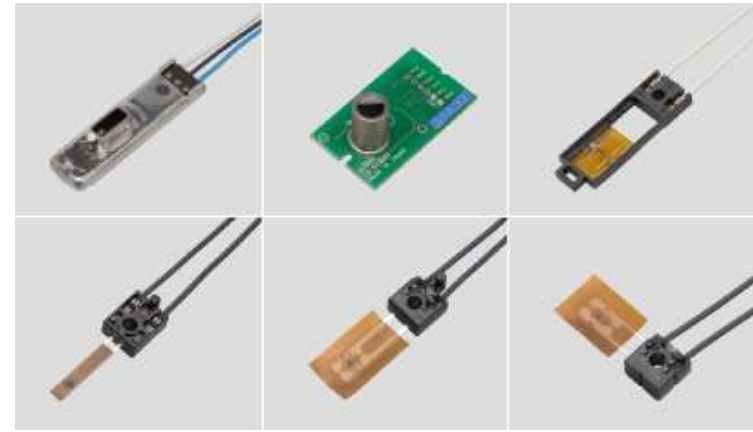


10°Cの温度変化で抵抗値は 変化する

温度センサ(2)

半導体の抵抗率も温度によって変化

→ 温度センサとして使用できる

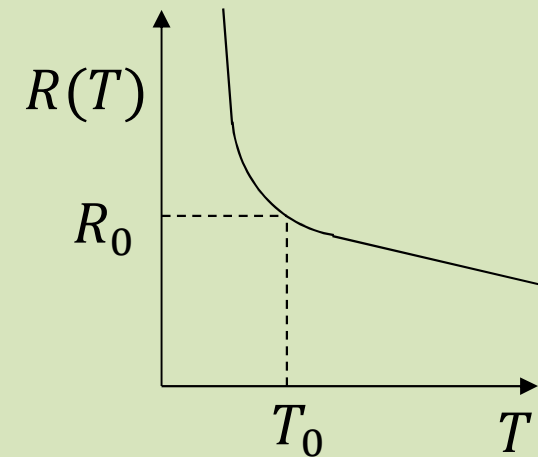


半導体の一般的な抵抗値

$$R(T) \cong R_0$$

R_0 : 温度 T_0 での抵抗値

B : サーミスタのB定数



金属の場合とは逆に、温度が上昇すれば 抵抗値は なる

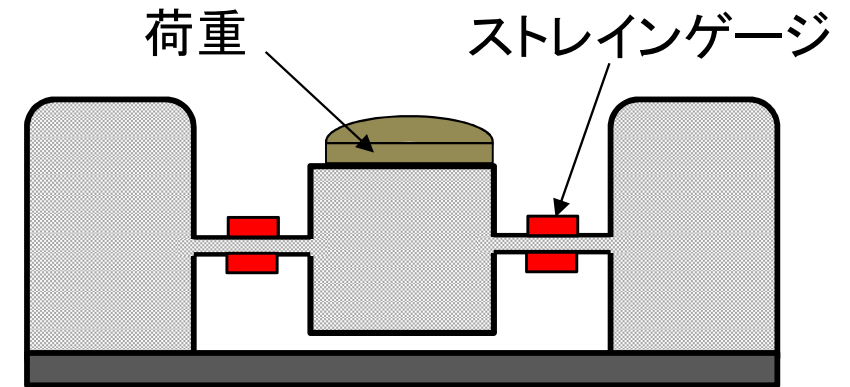
その変化率は大きく、金属の抵抗率変化より、 変化が大きい
感度が高い →

この場合、NTC (negative temperature coefficient) サーミスタと呼ぶ

抵抗型センサを応用した各種センサ(1)

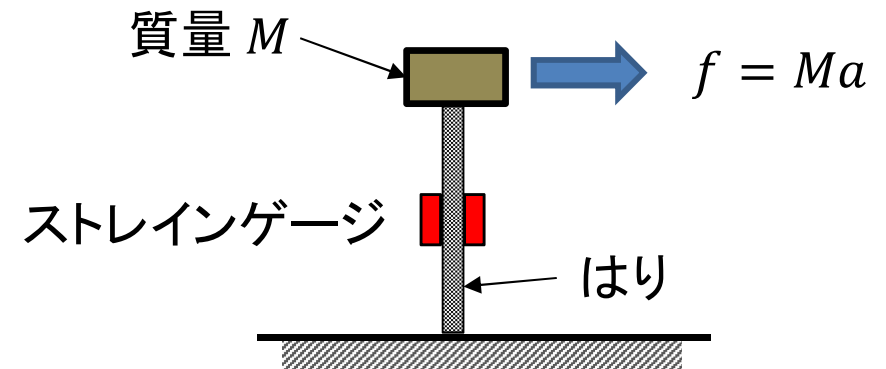
荷重計

- ・荷重を金属のはりの[]に変換
- ・それをストレインゲージで検出
- ・複数のストレインゲージで精度向上と[]を行う。



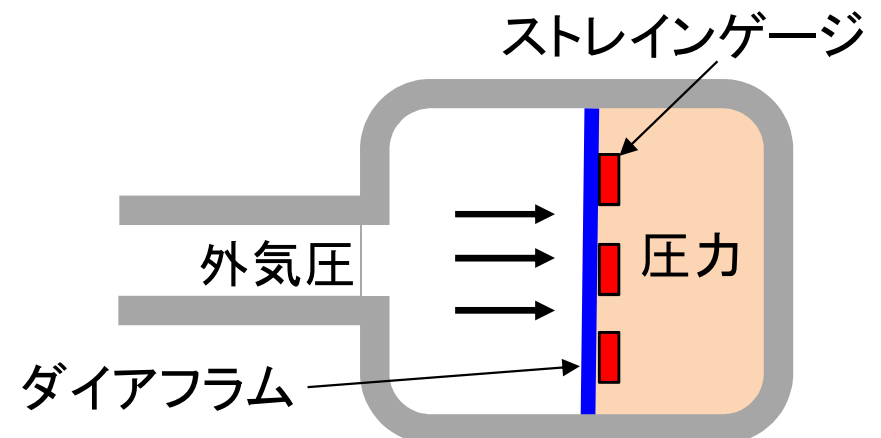
加速度計

- ・加速度を[]により力に変換し
- ・[]によりはりを変形
- ・変形によるひずみをストレインゲージで検出

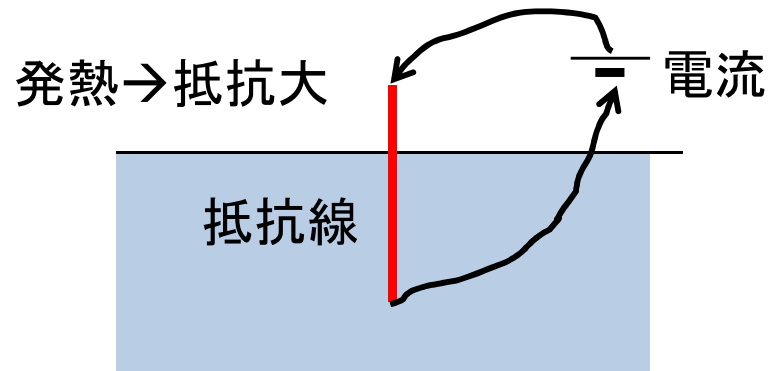


圧力計

- ・容器内に気体を導入し、ダイヤフラムで[]
- ・ダイヤフラムには[]もかかる
- ・容器内の圧力と外気圧との差により変形
- ・変形によるひずみをストレインゲージで検出

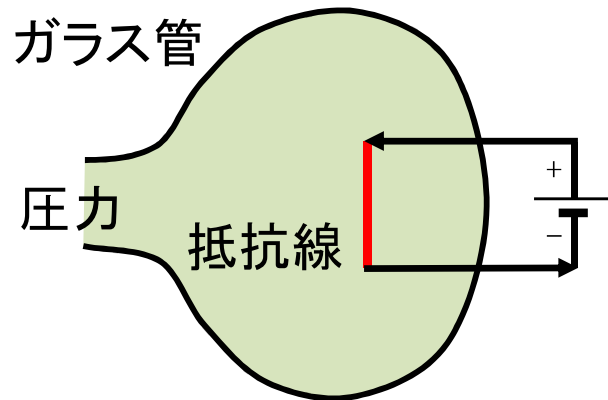


抵抗型センサを応用した各種センサ(2)



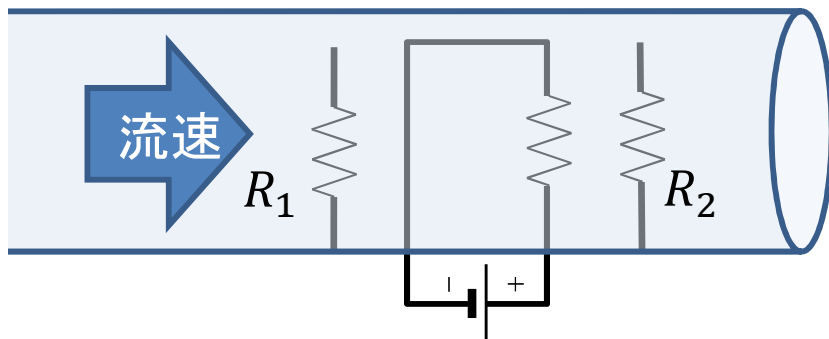
液面計

- ・抵抗線に電流を流し、発熱させる。
- ・液体中の方が空気中より しやすいことを利用
- ・抵抗値の減少により液面の を検出する



真空計

- ・ガラス管内の気体の圧力と気体温度は
- ・電流を流した抵抗線は気体により される
- ・放熱度は に依存する
- ・抵抗線の抵抗を検出し、真空度を検出



流速計

- ・ の抵抗に電流を流して発熱させる。
- ・ の抵抗に熱が伝導し、抵抗値 R_1 、 R_2 が変化
- ・流速がなければ、左右の抵抗は同じだが、流速により の抵抗への熱伝導が低下
- ・抵抗値の から流速を検出

容量変化型センサ

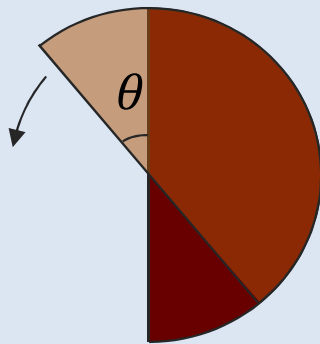


平行平板コンデンサの
静電容量 C

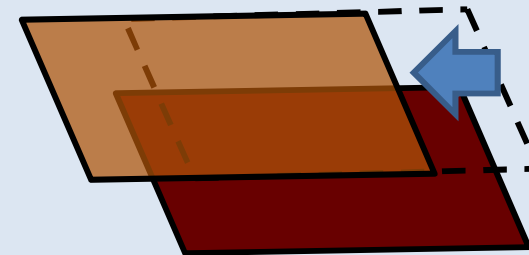
S : 電極の面積 d : 極板間の間隔
 ε : 電極間にある絶縁物の誘電率

$$C = \boxed{}$$

これらの定数を変化させることにより、いろいろなセンサが実現できる。
特に、シリコン微細加工技術を駆使して作られるマイクロセンサ等

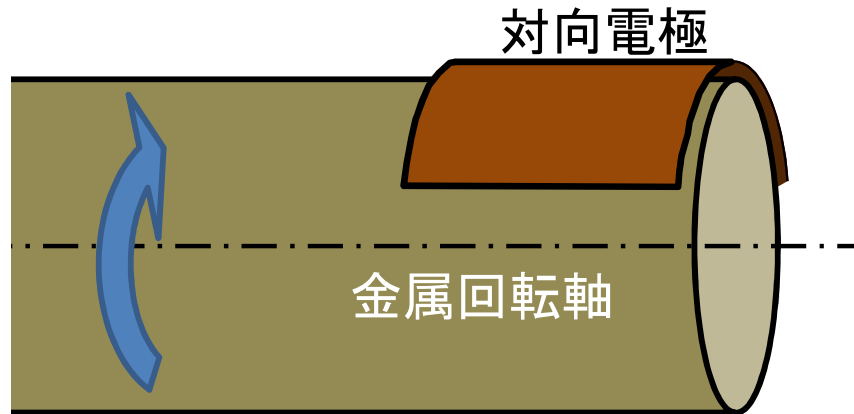


角度センサ: $\boxed{}$ の極板を $\boxed{}$ させ電極面積を変化させる



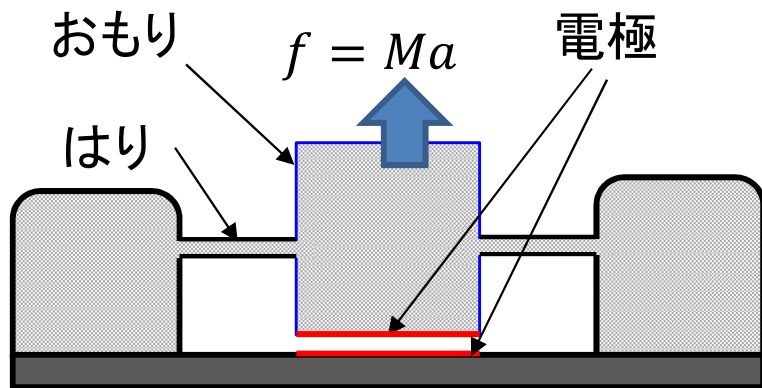
変位センサ
電極を $\boxed{}$ させることによりコン
デンサを形成する電極面積を変化させる

様々な容量変化型センサ



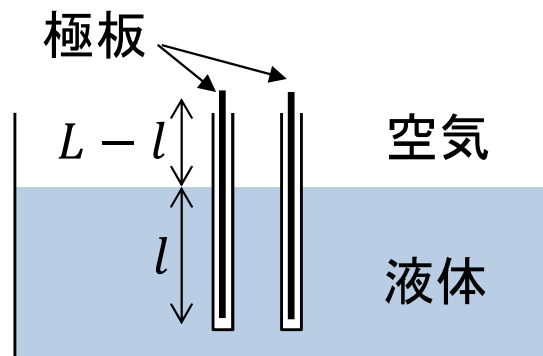
偏心センサ

- ・何らかの影響で回転軸がブレる
- ・対向電極との が変化
- ・ と電極間の静電容量が変化



加速度センサ

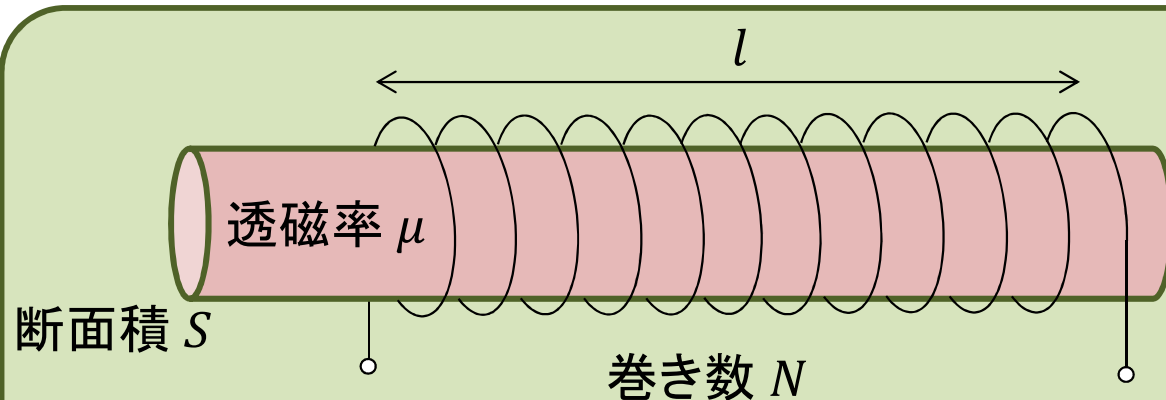
- ・はりで支えられたおもりに が働く
- ・はりの弾性によりおもりの位置が変化
- ・位置の変化が電極の の変化
- ・静電容量が変化



液面センサ

- ・空気と液体の は大きく違う
- ・空気部の容量は空気部の幅 に比例
- ・液体部の容量は液体部の幅 と、比誘電率に比例
- ・両者の容量の並列接続が合成容量

インダクタンス変化型センサ



ソレノイドコイルのインダクタンス L

$L =$

透磁率 μ

断面積 S

長さ l

巻き数 N

K : コイルの幾何学的形状で決まる定数

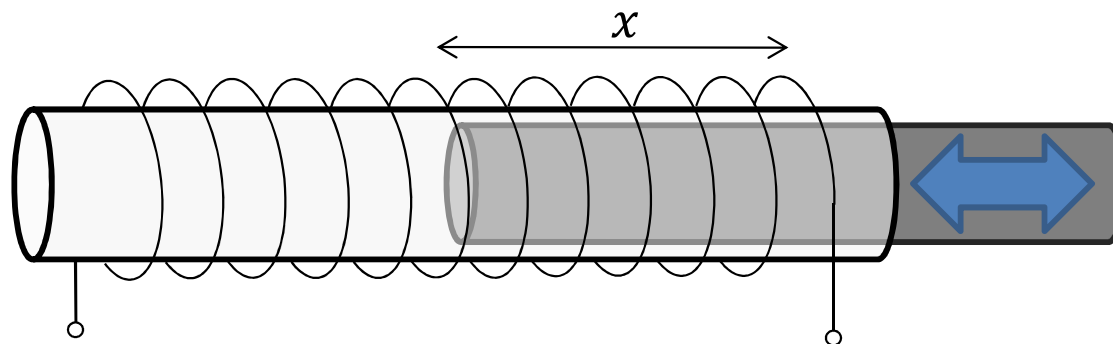
μ : コアの透磁率

S : コアの断面積

l : コイル長

N : コイルの巻き数

これらのパラメータのいずれかを何らかの物理量によって変化させる
ことができればセンサとして利用可能



- ・磁性材料をコイルに
- ・透磁率が により変化
- ・インダクタンスを測定
- ・位置センサになる

伝達インピーダンス変化型センサ

ある端子に電圧を印加したり、電流を流すことにより、 の電圧等が物理量により変化するタイプのセンサ

a. 相互インダクタンス変化型センサ

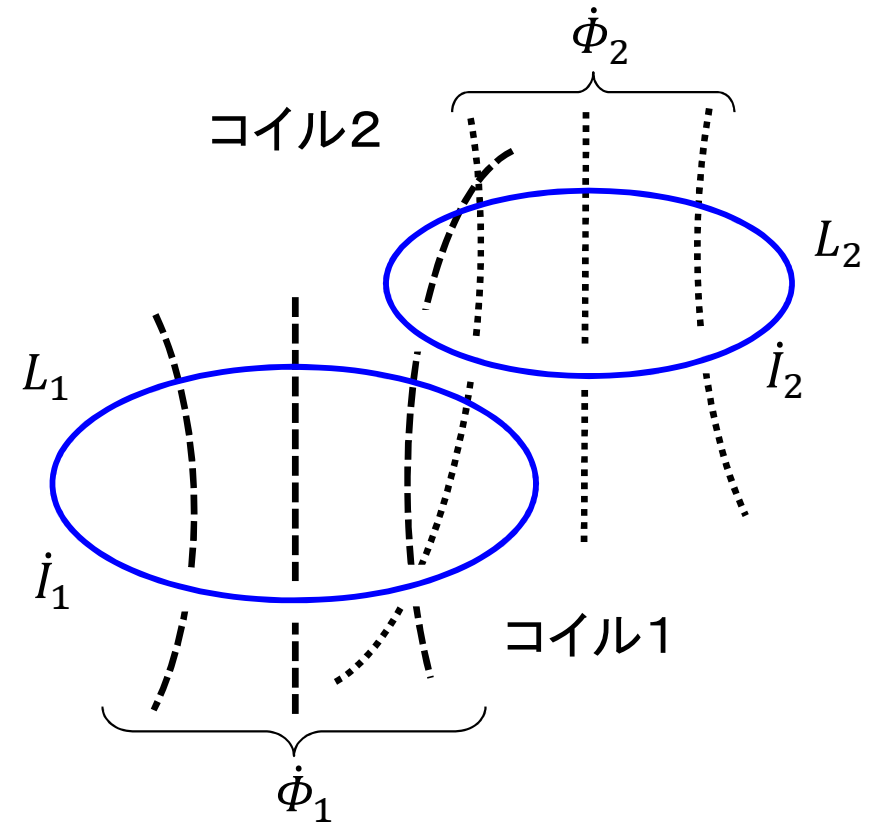
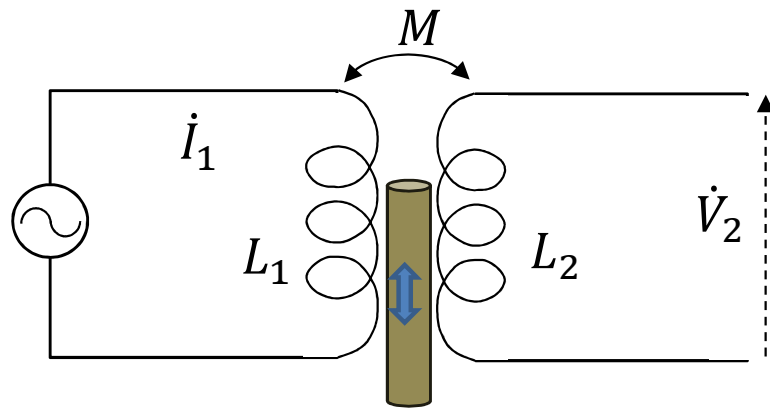
$$\begin{cases} \dot{\Phi}_1 = L_1 \dot{I}_1 + M \dot{I}_2 \\ \dot{\Phi}_2 = M \dot{I}_1 + L_2 \dot{I}_2 \end{cases}$$

M : コイル間の インダクタンス

L_1, L_2 : 各コイルの インダクタンス

M が物理量によって変化すれば、このコイル対は伝達インピーダンス型センサ

伝達インピーダンスは で表される



磁性体の位置が変化すれば、相互インダクタンス M が変化

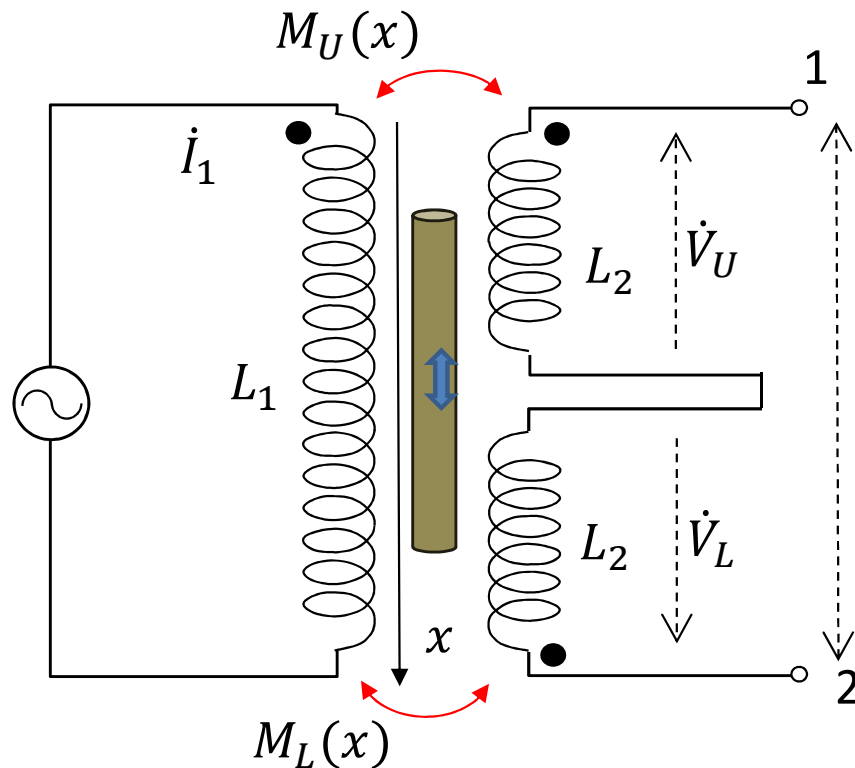
コイル2には $\dot{V}_2$ なる開放電圧が発生

$$\dot{V}_2 = \text{ }$$

差動トランス

2次側が二つのコイルからなる

二つのコイルを同一形状、巻き数で作成、 を逆にする
磁性体の位置によって、相互インダクタンス $M_U(x)$, $M_L(x)$ が変化
1次側に電流を流せば、2次コイルには $\dot{V}_U$, $\dot{V}_L$ なる開放電圧が発生



$$\dot{V}_U(x) = j\omega M_U(x) \dot{I}_1$$

$$\dot{V}_L(x) = j\omega M_L(x) \dot{I}_1$$

接点1,2間の電圧は

$$\dot{V}_{12}(x) = \text{ }$$

磁性体が2次コイルに対して対称な位置のとき
 $M_U(x) = M_L(x)$ となり、打ち消し合って

$$\dot{V}_{12}(x) = 0$$

磁性体位置の対称性が崩れると、コアの変位が2つの二次コイルの と
なって出力されるため、高精度な変位測定が可能

第2回復習テスト

1. 次のセンサの中で、インピーダンス変化型センサを選べ

静電容量型加速度センサ、赤外線サーモグラフィ、フォトダイオード、サーミスタ

2. 長さ5cm、抵抗 $10\text{k}\Omega$ のストレインゲージに力を加え抵抗が $10.02\text{k}\Omega$ になった。ストレインゲージの伸びは何 μm か

3. 以下の文章に間違いがあれば、訂正せよ

抵抗型温度センサは温度による抵抗器の膨張を抵抗変化として計測する

静電容量型加速度センサは、はりに取り付けた電極の容量変化を計測する

4. スマートホンに搭載されているインピーダンス変化型センサの例を挙げよ

電気電子計測

第3回 起電力型センサ

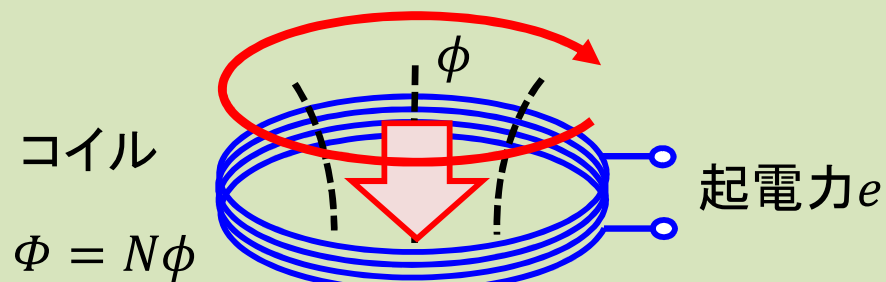
起電力型センサ

起電力を伴う物理現象

電磁誘導、熱起電力、焦電効果、圧電効果等



電磁誘導型センサの原理

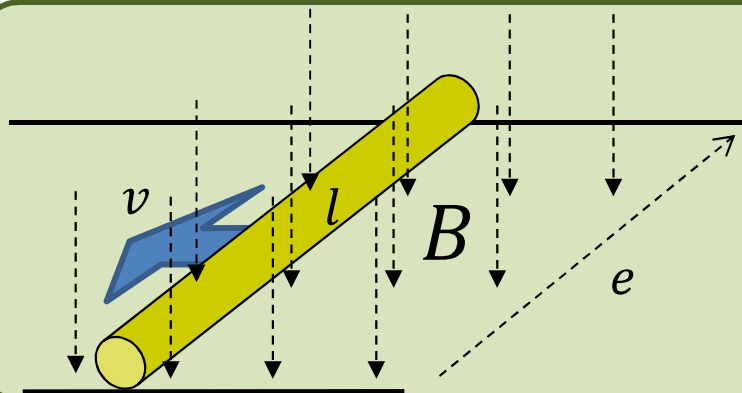


起電力の正の向きは磁束の向きに右ねじを進めるときのねじの回転方向

コイルの鎖交磁束 ϕ が に変化するとき、電磁誘導により

$e =$

なる起電力が磁束変化を妨げる向きに生ずる

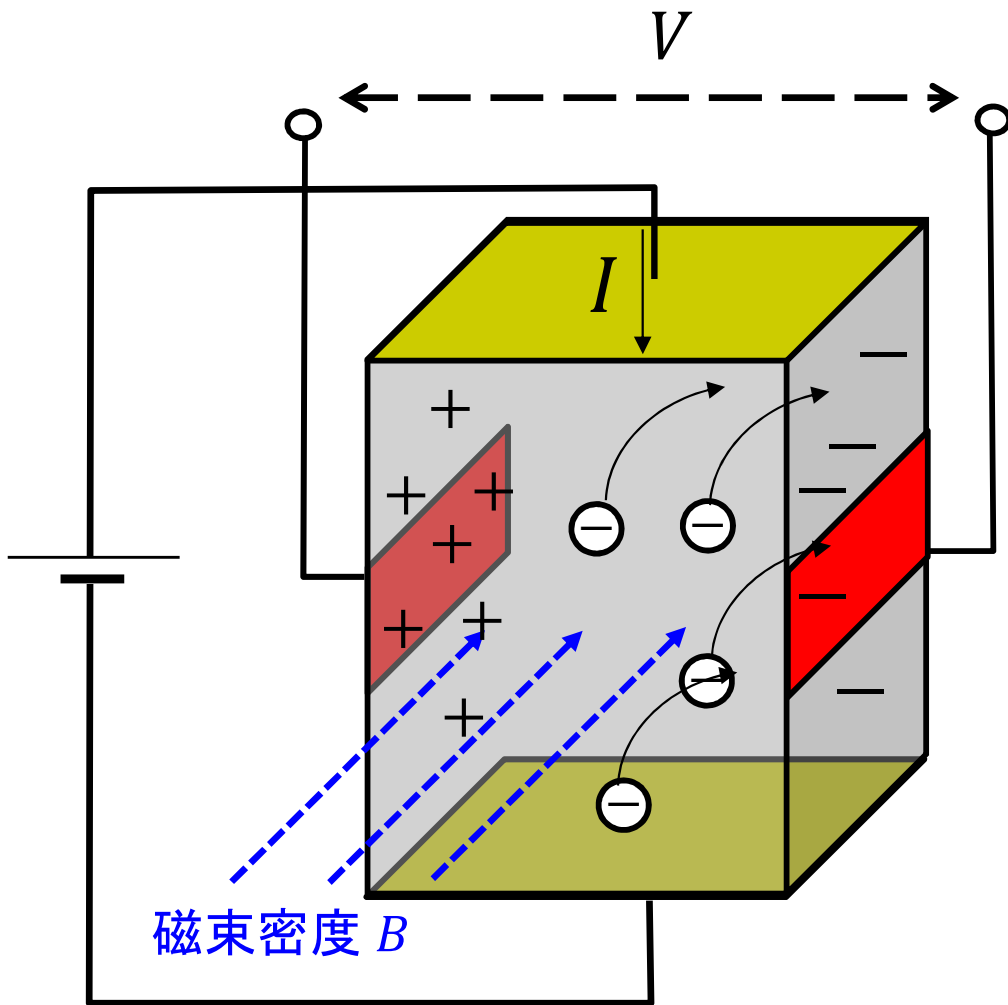


磁束密度 B の磁界中を長さ l の導体棒が、速度 v で移動するとき、棒の両端には

$e =$

なる起電力が生ずる

ホール素子

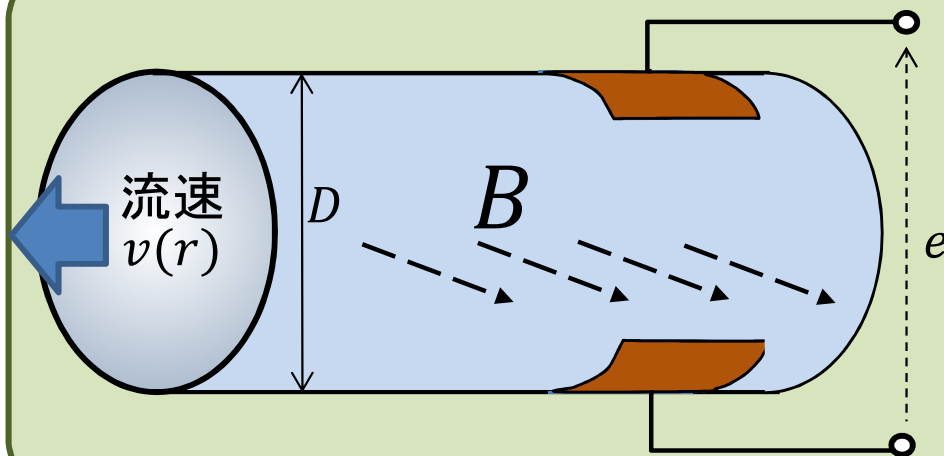


ホール効果

- ・半導体の単結晶を電極で挟み電界をかけ、電流を流す
- ・同時に電界に に磁界を加える
- ・荷電粒子は 電界と磁界に垂直な方向に を受ける
- ・荷電粒子の運動と磁界に な側面に 荷電粒子 が偏る
- ・側面の電極間に電位差 V が表れる
- ・ホール電圧 V は に比例

このような素子をホール素子と呼び、磁界センサとして利用される

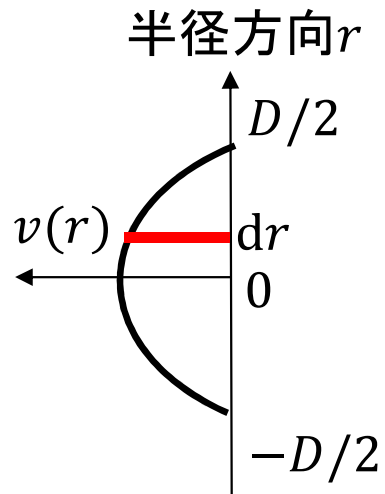
電磁流量計



直径 d の円筒のパイプ中に の流体が流れている

このパイプに磁束密度 B なる磁界を加える

上下に設けられた電極に $e =$ に相当する起電力が発生



実際には円管内の速度は一樣ではなく、中心からの半径 r によって、分布 を持っているので、微小円環 dr で発生する微小起電力 de は

$$de = Bv(r)2\pi(r + dr) - Bv(r)2\pi r = Bv(r)2\pi dr$$

これを、半径で積分すると起電力 e は

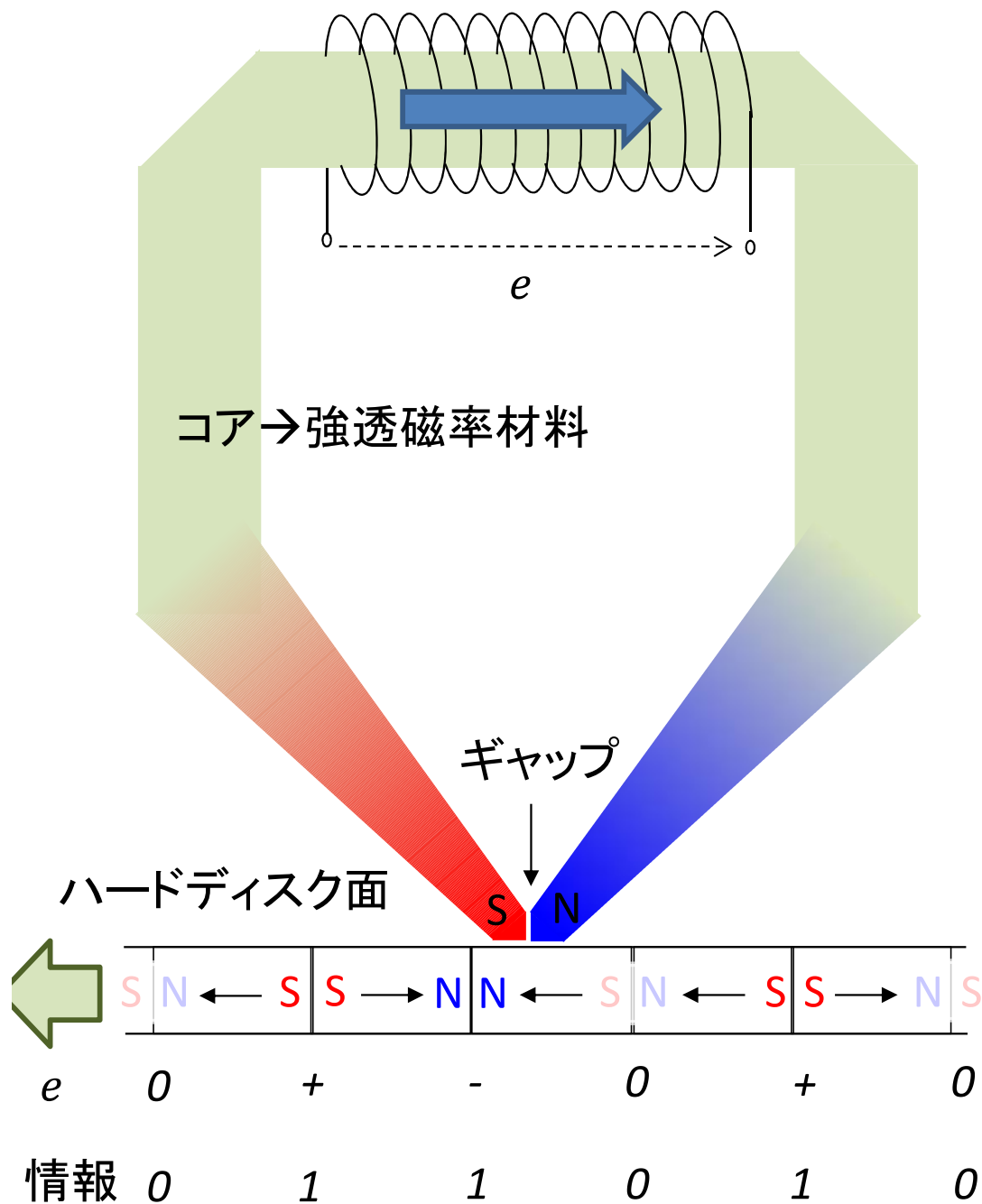
$$e = \int_{-D/2}^{D/2} de = \int_{-D/2}^{D/2} BDv(r)2\pi dr = BD \int_{-D/2}^{D/2} 2\pi v(r) dr = BD \overline{v(r)}$$

$\overline{v(r)} :$

起電力 e がわかれば、断面積 S は $\pi D^2/4$ より、流体の流量 Q は

流体の流量 $Q = S \overline{v(r)} =$

磁気ヘッド



磁気ヘッドの読み取り時

ハードディスク面が回転

コア先端がハードディスク面の磁化パターンによって磁化される

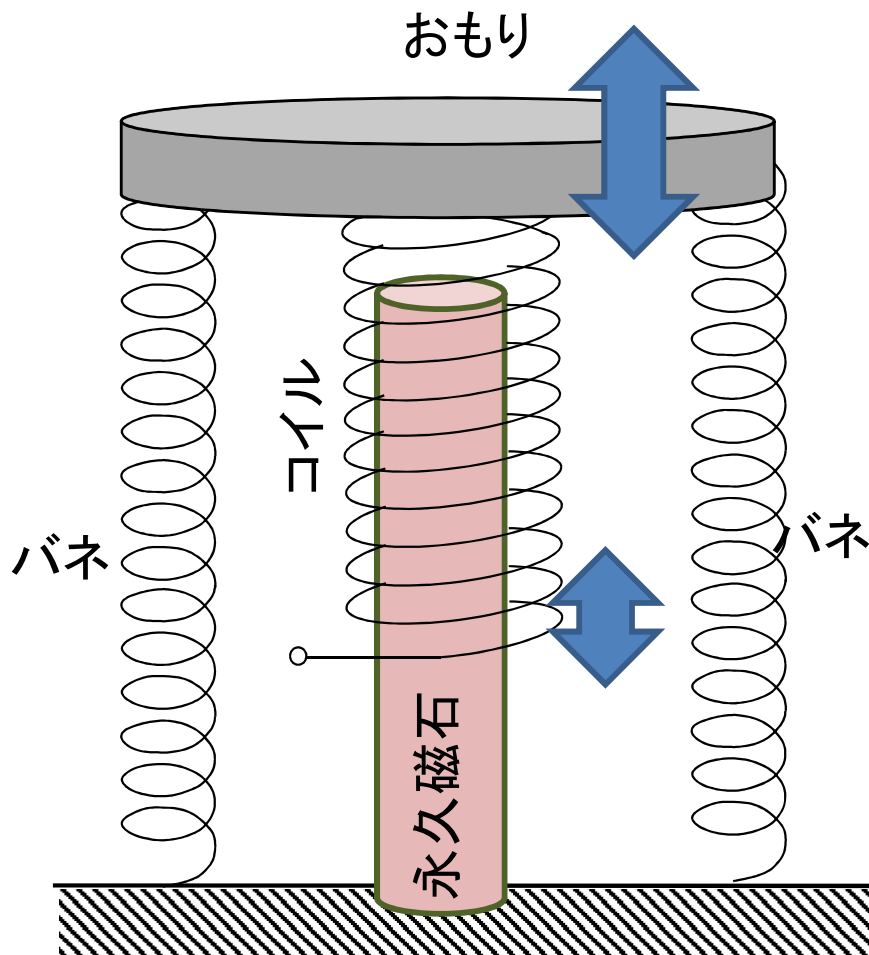
コア内部の 磁界 が変化

電磁誘導により、変化を打ち消す向きに起電力 e 発生

磁化パターンのピークがギャップを通過すれば、コア内部の磁界が逆転し、起電力が 逆符号

起電力の 符号 が、磁化パターンの変化に一致

振動センサ



振動センサ

- ・ばねによって支えられたおもりにコイルが固定されている
- ・振動によって が振動
- ・コイルも振動
- ・コイルに対する永久磁石の が変化
- ・永久磁石から発生し、コイルに鎖交する磁束が時間的に変化
- ・磁束変化を 向きにコイルに電磁誘導による誘導起電力が発生

マイクと同じ原理

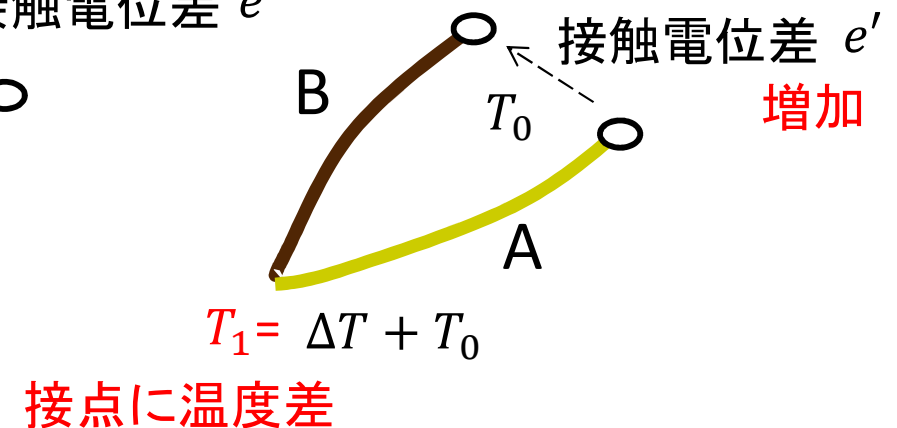
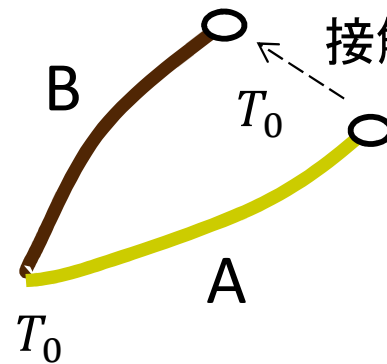
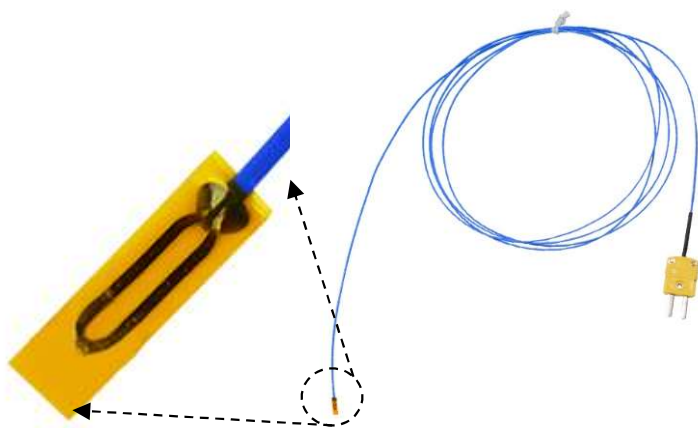
コイルに時間変化する電流を流せば、スピーカになる。

熱電対

金属内の自由電子を金属の外へ取り出すには、一定のエネルギーを与えなければならない。このエネルギーを金属の仕事関数(work function)という。

仕事関数は金属の種類によって異なるので、2種類の金属を接触させると、接触面を通して仕事関数の小さい金属から大きい金属へ[]が移動

その結果、2つの金属の[]に接触電位差が生じる。接触電位差は温度の関数。両端に温度差があると、接触電位差に違いが表れ、熱起電力として取り出せる



片方の接点の温度が既知であれば、電位差 $e' - e$ からもう片方の温度がわかる
100° の温度差で []
温度を測定するために異種の金属をつないだものを熱電対と呼ぶ

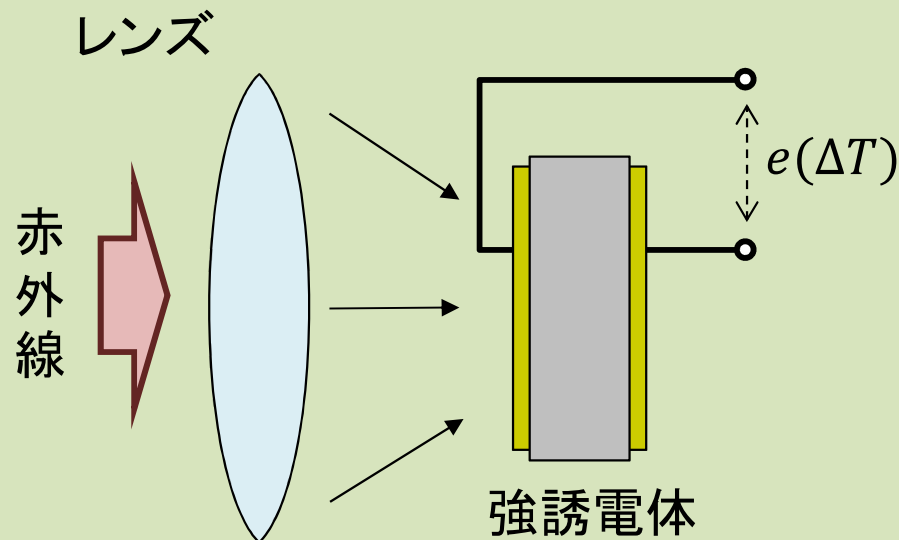
パイロセンサ

焦電効果
パイロ効果

温度変化によって誘電体の

が変化する現象

- ・この現象を示す物質は、焦電体と呼ばれる。
- ・焦電効果を有する材料 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ や BaTiO_3 などの多くは である
- ・焦電体は、常温でも常に分極しているが、通常は表面に しているので分極は観測されない。
しかし、温度の変化によって すると、変化分を電圧として検出することができる。



この性質から、温度変化を電圧として
取り出す焦電素子として用いられる。

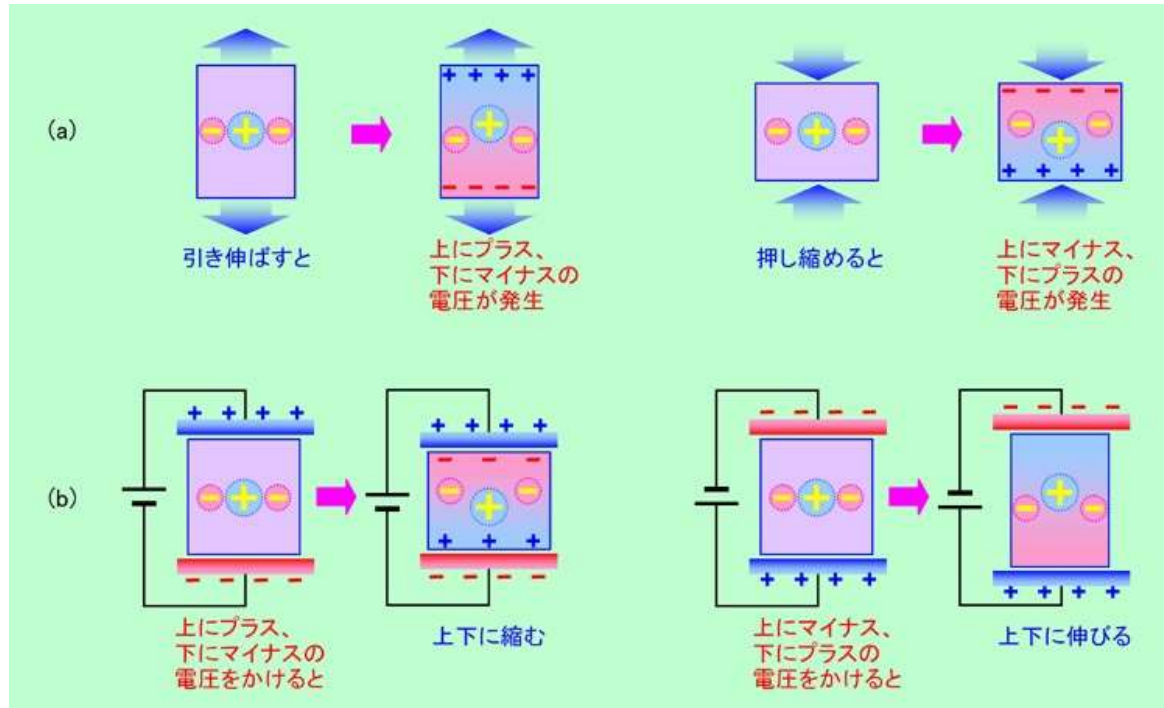
また、集光レンズと併用することによって
に用いられる。

構造が単純で安価であることなどから、
などに広く用いられる

圧電センサ

圧電効果

ひずみを与えると 電圧 を発生する材料があり、そのような材料のうち、圧縮ひずみと引っ張りひずみで 電圧 の極性となる現象

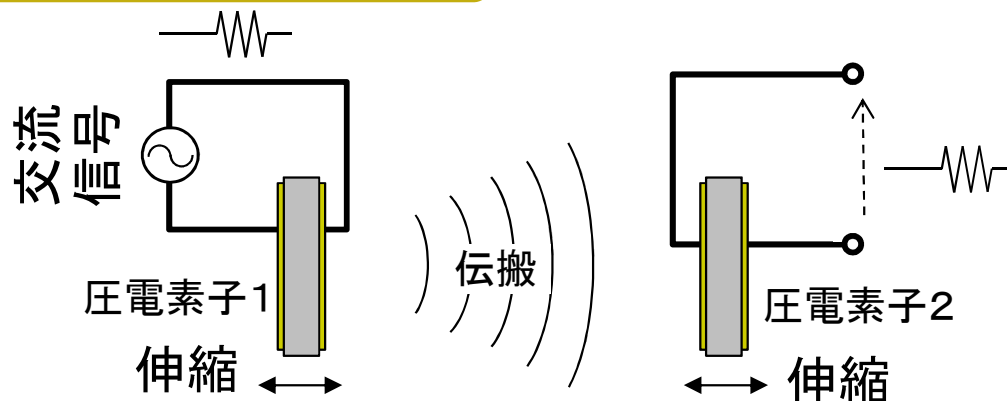


・圧電材料: $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ や BaTiO_3 等の強誘電体のほか、水晶、 ZnO がある

・圧電材料に電界を印加すると、逆に、ひずみが発生する。これを逆圧電効果という

・圧電材料は時間的に変動しない静的なひずみでも応答する

超音波トランスデューサ



・圧電素子1に交流電圧を印加

・圧電素子1が周期的に伸縮

・伝搬媒質中に 伝搬

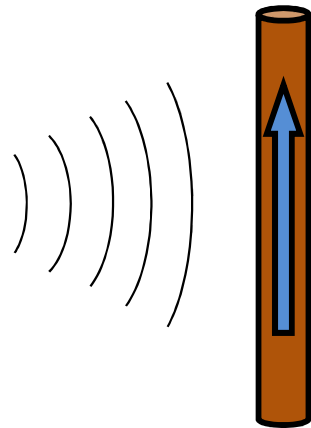
・圧電素子2が周期的に伸縮

・交流信号の 電圧

アンテナ

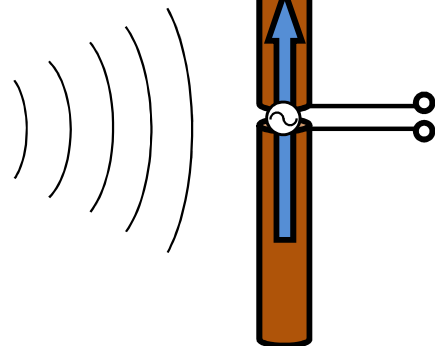
電磁波(電界と磁界の時間、空間変化が波動として伝搬)

アンテナ 電磁波 を電圧、電流に変換するトランスデューサ



- ・導体に電磁波が到来
- ・導体面上では電界は (境界条件)
- ・到来した電界をキャンセルするような が導体上に誘起
- ・導体上に が流れる

導体にギャップがあった場合



- ・同様に導体上に電流が流れる
- ・導体間はあるインピーダンスを持つ
- ・ギャップ間には開放電圧が発生
- ・電磁波中に置かれた は起電力が発生

導体中に設けられたスリット間に電磁波が到来しても同様に起電力を発生

第3回復習テスト

1. 抵抗型流量計に対する電磁流量計の利点を述べよ

2. 磁界の空間分布を知りたいときには を測りたい領域で動かして、場所毎にその を測定する

3. 以下の文章に間違いがあれば、訂正せよ

熱電対は異種の金属の温度差による抵抗率の違いから温度を測定するセンサである

圧電センサはひずみにより発生する抵抗変化を測定するひずみセンサである

アンテナは超音波を電圧、電流に変換するセンサである

電気電子計測

第4回 信号源インピーダンス

計測対象からの電氣的な信号を計測することを考えるとき、その計測対象の回路的性質を把握しなければならない。

なぜなら、計測対象を計測するために計測器をつなげることにより計測対象が影響を受ける可能性があるからである

この章では、計測対象の信号源の性質、すなわち、そのインピーダンスについて深く考える

エネルギーと電圧

位置エネルギー → 物体が『ある位置』にあることで物体に蓄えられるエネルギー
物体が動いてなくてもよい、その物体が潜在的に可能な仕事

電池の+極、-極を繋げなくても、両極間にはある電位差が発生しており、
繋げると電気抵抗に抗って電流を流す能力を持っている

電位 → 力学における に相当する概念

電場中で をある距離動かした際に、クーロン力に対してした仕事

電圧 → 2点間の電位の差、一様電界中ではその距離差と電界の積
電子が動いてなくとも、電界があればよい

単位は [V] ボルト → [J/C]

起電力は電子を動かすことのできる能力、 (運動能力) に相当

電圧は電荷が静止状態で定義可、結果として電荷を動かせる能力
『電圧が流れる』という言い方はない

エネルギーと電流

運動エネルギー → 物体の運動に伴うエネルギー、物体に作用する力とその動き

電池の＋極と－極を金属でつなぐと、両極間の電位差内の電場により発生するクーロン力に逆らって、ある距離だけ単位正電荷が動く

電流 → 単位時間当たりにある面を通過する正電荷の総量 (通過 × 通過)

電流は電子の物理的な によって発生する。電子が静止していれば電流はゼロ、電圧とその間のインピーダンスの結果として起こる電子の運動に相当

開放したコンデンサに貯まった電荷 → 極板間に電位差 → 極板間に抵抗接続
→ 電流が急激に流れ、徐々に減少 → 電荷がなくなれば

回路に電流を流し続けるには

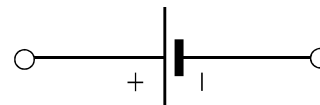
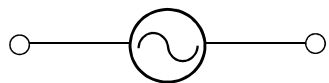
電荷を基準電位からクーロン力に対して電源電圧 V だけ連続的に持ち上げる必要

→ 電流 I が流れているときある時間 Δt の間に通り抜ける総電荷量 $Q = I\Delta t$

→ 電源が回路に1秒間になす総仕事量 $P = \frac{VQ}{\Delta t} = VI$ →

理想電圧源

(理想)電圧源 電源電圧 $V(t)$ が接続する相手の負荷(端子条件)によらない電源

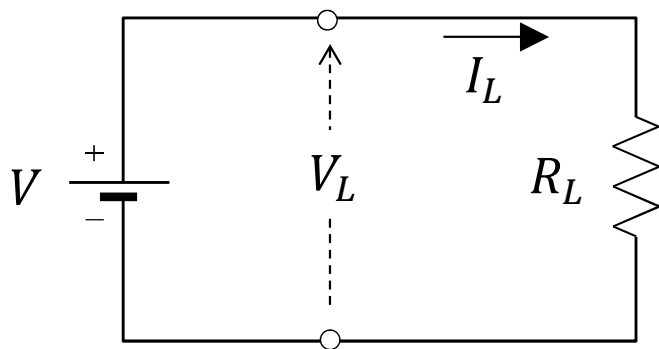


$V(t)$ が時間変動する(交流)電圧源

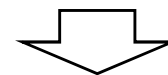
$V(t)$ が一定の直流電圧源

電圧がゼロの電圧源は端子条件に関わらず電圧がゼロなので
 もしくは を表す。

基本的に電圧源の『内部』は導線でつながっている



電圧源 V に負荷抵抗 R_L を接続した場合
 R_L にかかわらず、負荷電圧 $V_L = V$ である



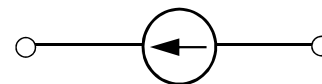
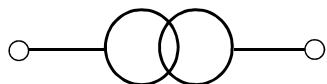
$R_L = 0$ でも、 $V_L = V$ でないといけない

これを実現しようとする、あらゆる場所で等電位である抵抗のない金属においても、
有限の電位差を生み出せるほど無限に大きい電流を流さないといけない

“理想”電圧源は

理想電流源

(理想)電流源 電源電流 $I(t)$ が接続する相手の負荷(端子条件)によらない電源

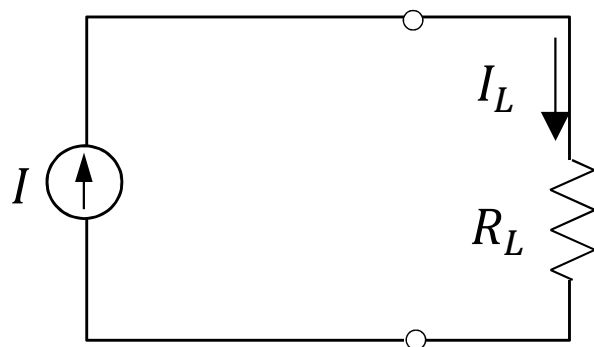


$I(t)$ が時間変動する(交流)電流源

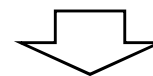
$I(t)$ が一定の直流電流源

電流がゼロの電流源は端子条件に関わらず電流がゼロなので
[] もしくは [] を表す。

基本的に電流源の内部では導線は繋がっていない



電流源 I に負荷抵抗 R_L を接続した場合
 R_L にかかわらず、負荷電流 $I_L = I$ である



$R_L = \infty$ でも、 $I_L = I$ でないといけない

電流源の端子を開放 ($R_L = \infty$) しても、有限の電流を流さないといけない
無限の電源電圧が必要

“理想”電流源は []

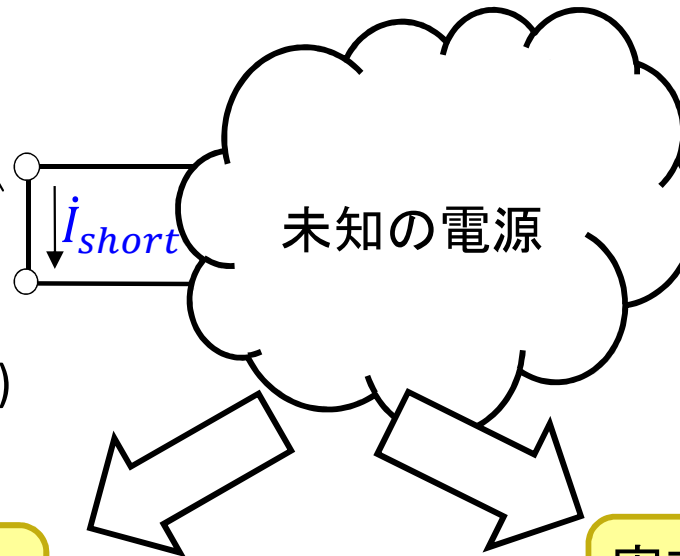
鳳テブナンの定理

実在のいかなる電源も、
一つの と 一つの
で表すことができる

$\dot{V}_{open}$: 電源の開放電圧
電源端子を開放(Open)
した際に現れる電圧

$\dot{V}_{open}$

$\dot{I}_{short}$: 電源の短絡電流
電源端子を短絡(Short)
した際に流れる電流

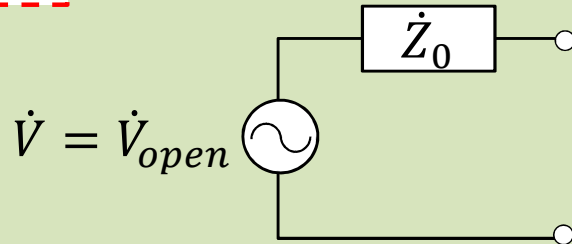


$\dot{Z}_0 =$

(内部インピーダンス)

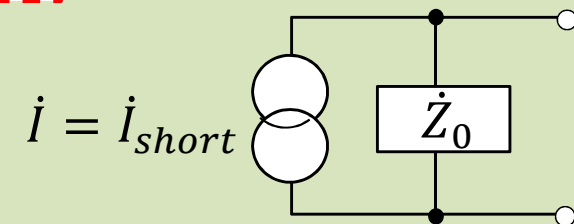
実在の電圧源のモデル

電源電圧 $\dot{V}_{open}$ の理想電圧電源と
 な電源インピーダンス $\dot{Z}_0$



実在の電流源のモデル

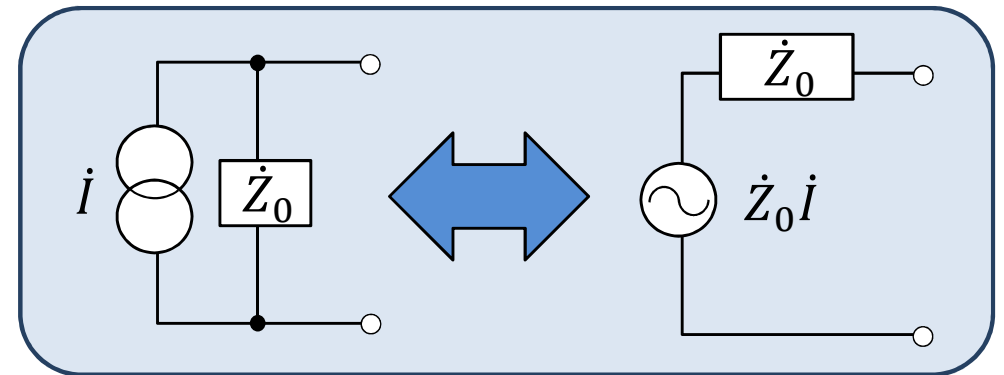
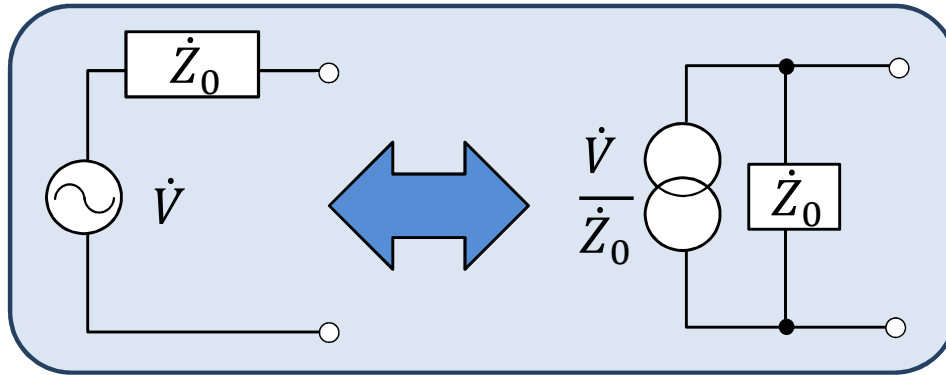
電源電流 $\dot{I}_{short}$ の理想電流源と
 な電源インピーダンス $\dot{Z}_0$



両者は等価

一般の電源と負荷

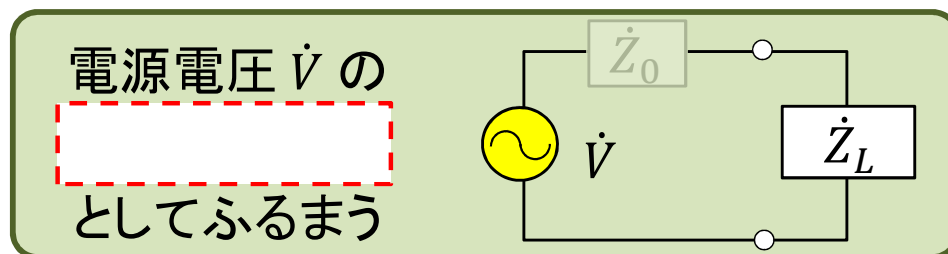
一般の電圧源と電流源はその電源インピーダンスを用いて、
お互いに で回路的に等価である



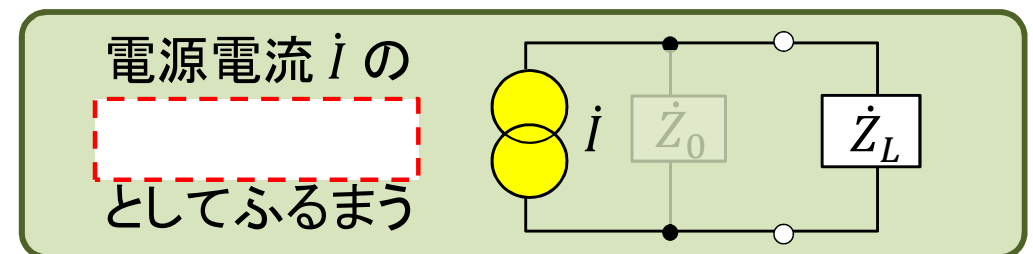
電源に繋げる回路のことを**負荷 (Load)** とよぶ。負荷が軽い→電流小→インピーダンス大
一般の電源は電源インピーダンス $\dot{Z}_0$ があるため、電源電圧や電源電流を
そのまま できないことに注意

実在の電源装置を考えると、同じ電源でも**負荷のインピーダンス $\dot{Z}_L$** によって...

$$\dot{Z}_L \gg \dot{Z}_0$$



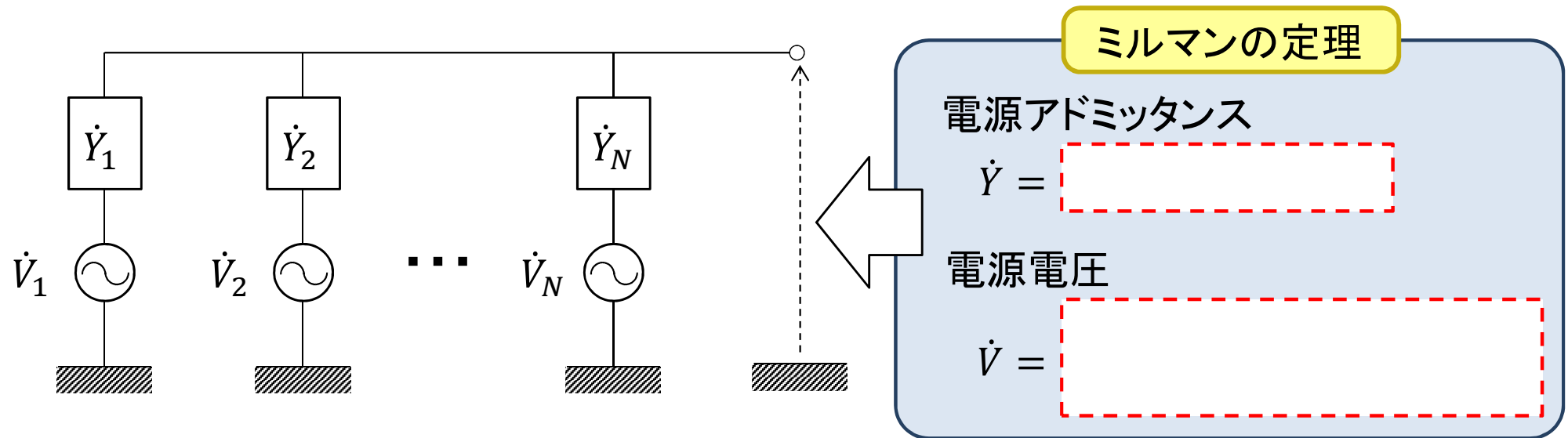
$$\dot{Z}_L \ll \dot{Z}_0$$



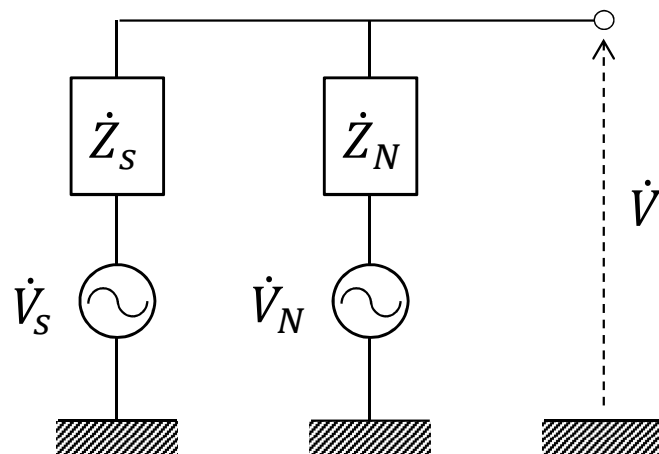
一般の電源は負荷の によって、電圧源にもなるし、電流源にもなる

信号源インピーダンスの意味

アドミッタンス：物理的にはインピーダンスと等価。値はインピーダンスの逆数



信号源に雑音源 $\dot{V}_N$ が浮遊インピーダンス $\dot{Z}_N$ を介して、重畳している場合

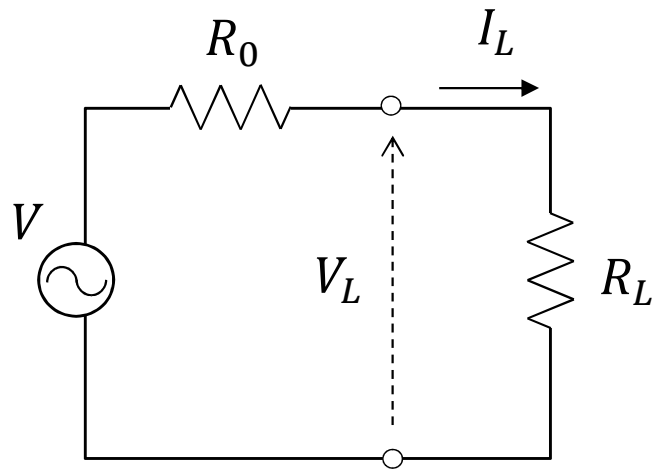


$$\dot{V} = \frac{\frac{\dot{V}_S}{\dot{Z}_S} + \frac{\dot{V}_N}{\dot{Z}_N}}{\frac{1}{\dot{Z}_S} + \frac{1}{\dot{Z}_N}} = \frac{\dot{V}_S + \frac{\dot{Z}_S}{\dot{Z}_N} \dot{V}_N}{1 + \frac{\dot{Z}_S}{\dot{Z}_N}}$$

一般に、 $|\dot{Z}_S| \ll |\dot{Z}_N|$ なので、 $\dot{V} = \dot{V}_S + \frac{\dot{Z}_S}{\dot{Z}_N} \dot{V}_N$

信号源インピーダンス $|\dot{Z}_S|$ が 、端子電圧 $\dot{V}$ は雑音電圧の影響を受けにくい

信号源インピーダンスと信号エネルギー



理想電圧源 V と信号源インピーダンスが純抵抗 R_0 となる電圧源で表される信号源がある

信号源から負荷 R_L に供給される電力 P_L は

$$P_L = \frac{V_L^2}{R_L} = \frac{1}{R_L} \left(\frac{R_L}{R_0 + R_L} \right)^2 V^2 = \frac{R_L}{(R_0 + R_L)^2} V^2$$

負荷 R_L が変化したときの電力 P_L の最大値について考える

を考えたとしても等価なので、

$$\frac{\partial}{\partial R_L} \frac{V^2}{P_L} = \frac{\partial}{\partial R_L} \frac{(R_0 + R_L)^2}{R_L} = \frac{\partial}{\partial R_L} \left(R_L + 2R_0 + \frac{R_0^2}{R_L} \right) = 1 - \frac{R_0^2}{R_L^2} = 0$$

となる、条件は $R_L = \pm R_0$ よって

のとき P_L は最大となり、

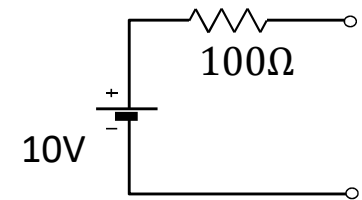
最大値 $P_{Lmax} =$

信号源から取り出せる
最大の電力(有能電力)

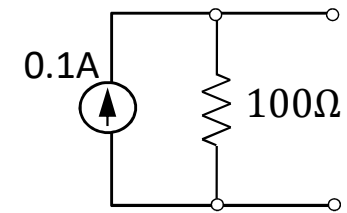
信号源(電圧源)から取り出せる最大の電力は信号源抵抗が ほど大きい

第4回復習テスト

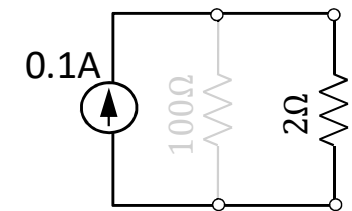
1. ある電源の開放電圧、短絡電流がそれぞれ、直流10V、0.1Aであった。この回路の等価回路を理想電圧源と内部インピーダンスで表せ



2. 1の電源を理想電流源を持つ等価回路で表せ



3. 1の電源に 2Ω の負荷抵抗を持つモータを接続したとき、この電源は理想電圧源、理想電流源のどちらのように振る舞うか？理由とともに答えよ



4. 電圧測定において信号源インピーダンスを小さくする利点を二つ述べよ

電気電子計測

第5回 信号波形とフーリエ変換

信号波形は信号源の性質を決めるもう一つの重要なパラメータである
信号が、直流か、交流か、パルスのような単発信号かによって、測定方法や測定パラメータが全く異なる

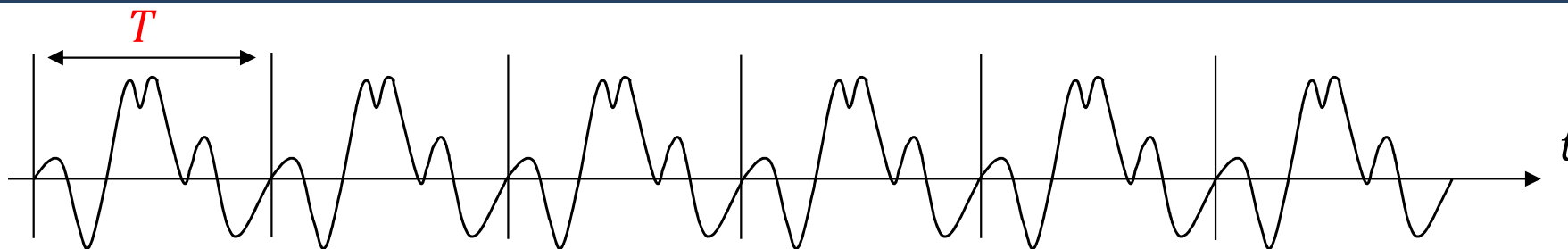
計測すべき信号の性質を十分理解することが必要

信号の特徴を調べる上で、時間領域に加えて、周波数領域での性質も考える必要があり、フーリエ変換の性質も理解する

周期信号と信号パラメータ

信号波形が以下の関係を満たすとき、 $e(t)$ を周期信号といい、 T を という

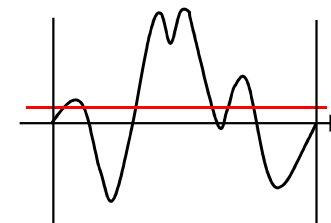
$$e(t) = e(t + nT) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



平均値
(mean)

$$\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t) dt$$

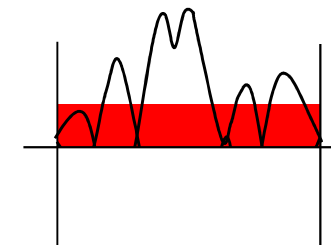
信号の 成分



2乗平均値
(mean square)

$$\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t)^2 dt$$

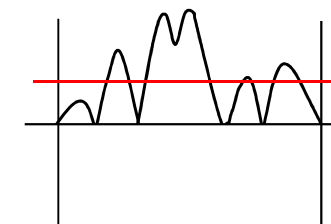
信号に1Ωの抵抗を接続した
ときに消費される



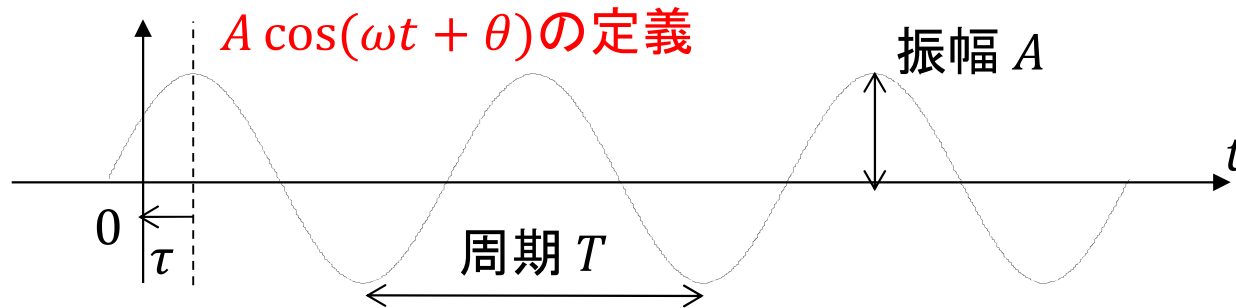
実効値、RMS値
(root mean square)

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t)^2 dt}$$

電力を与
える直流信号の大きさ



フーリエ級数展開



周波数 $f = 1/T$

角周波数 $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$

位相 $\theta = 2\pi\tau/T$

$e(t)$ を周期が T の任意の周期信号とし、その平均値が有限確定値を有する場合
次のように、周期 T/n ($n = 1, 2, \dots$) の正弦波形の級数で表すことができる

$$e(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)$$

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t) dt$$

信号の直流成分()

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t) \cos(n\omega t) dt$$

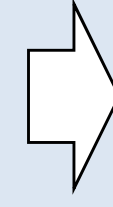
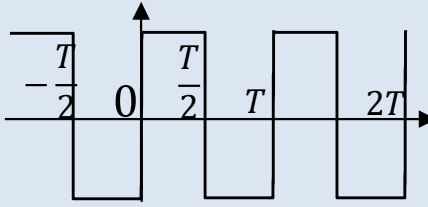
$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t) \sin(n\omega t) dt$$

a_n 、 b_n はそれぞれ信号が有する周期 T/n のコサイン波、サイン波の成分(強さ)を表す。

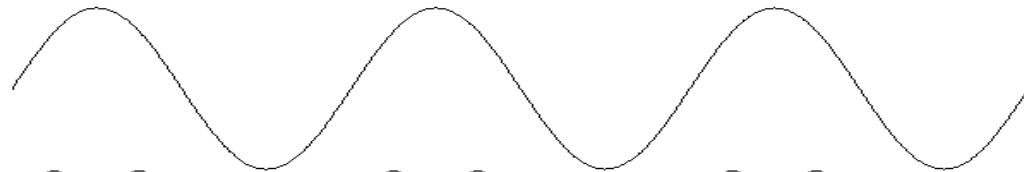
もとの周期と同じ周期を有する成分を
 T/n の周期成分を (基本波の n 倍の周波数成分)とよぶ

高調波が含まれた信号は という

方形波のフーリエ係数

$$e(t) = \begin{cases} -1 & (-\frac{T}{2} < t < 0) \\ 1 & (0 < t < \frac{T}{2}) \end{cases}$$

$$a_0 = a_n = 0$$
$$b_n = \frac{2}{n\pi} \{1 - \cos n\pi\}$$
$$e(t) = \frac{4}{\pi} \left\{ \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \cdots + \frac{1}{2m-1} \sin(2m-1)\omega t + \cdots \right\}$$

基本波のみ



3次高調波を加えた場合



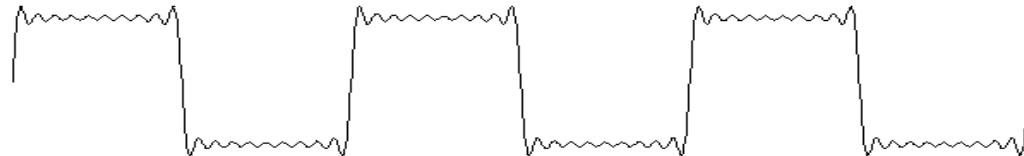
5次高調波を加えた場合



7次高調波を加えた場合



20次高調波を加えた場合



任意の周期信号は基本波の の周波数を持つ正弦波の和で表される。

複素正弦波と負の周波数

では、その信号にある特定の周波数の波がどれくらい含まれているかを考えよう
その周波数のフーリエ係数 a_n 、 b_n がその周波数成分の大きさを与える

$$a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) = \Rightarrow \text{これらの大きさをどう定義するか?}$$

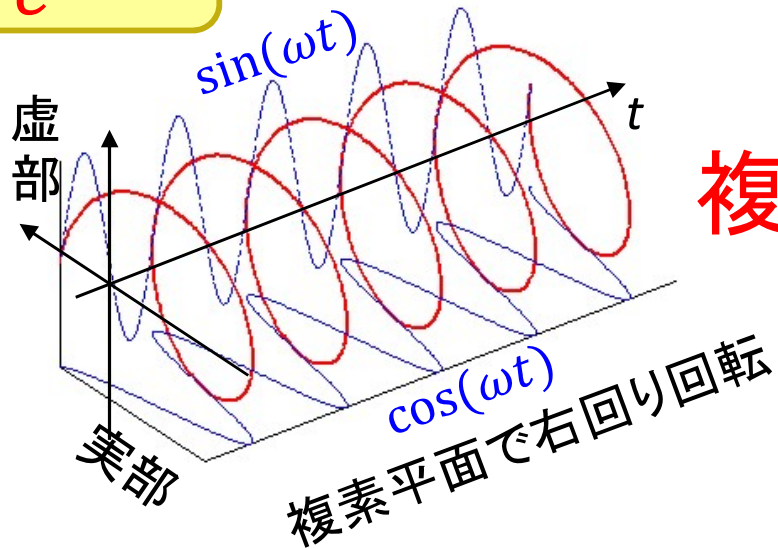
オイラーの公式より

$$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j \sin(\omega t)$$

$$e^{-j\omega t} = \cos(\omega t) - j \sin(\omega t)$$

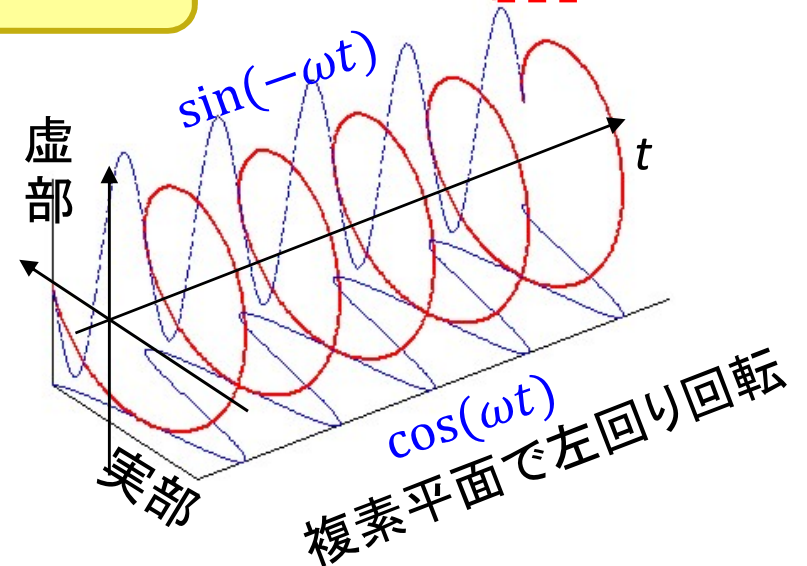
$$e^{j\omega t}$$

の周波数



$$e^{-j\omega t}$$

の周波数



複素正弦波

$$\cos(n\omega t) = \frac{e^{jn\omega t} + e^{-jn\omega t}}{2}$$

$$\sin(n\omega t) = \frac{e^{jn\omega t} - e^{-jn\omega t}}{2j}$$

複素フーリエ級数展開

$$a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) = a_n \frac{e^{jn\omega t} + e^{-jn\omega t}}{2} + b_n \frac{e^{jn\omega t} - e^{-jn\omega t}}{2j}$$

$$= \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\omega t} + \frac{a_n + jb_n}{2} e^{-jn\omega t}$$

定義より

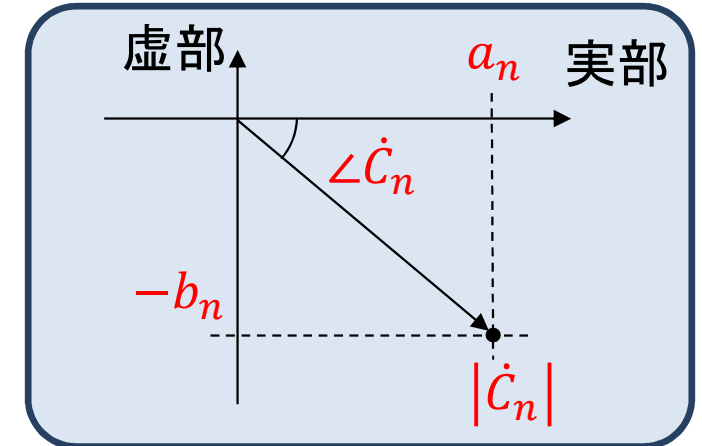
$$a_{-n} = a_n$$

$$b_{-n} = -b_n$$

$$= \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\omega t} + \frac{-j}{2} e^{-jn\omega t}$$

正と負の複素正弦波でまとめ直す

$$\begin{aligned} e(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\omega t} + \frac{a_{-n} - jb_{-n}}{2} e^{-jn\omega t} \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\omega t} + \sum_{n=-\infty}^{-1} \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\omega t} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} b_0 = 0 \text{ より} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\omega t} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{C}_n e^{jn\omega t} \end{aligned}$$

複素フーリエ係数 $\dot{C}_n =$

 の概念を導入することで、各周波数成分の 、 を定義

複素フーリエ係数

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t) \sin(n\omega t) dt$$

を $\dot{C}_n = \frac{a_n - jb_n}{2}$ に代入すれば

$$\dot{C}_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t) \cos(n\omega t) dt - \frac{j}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t) \sin(n\omega t) dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t) \{\cos(n\omega t) - j \sin(n\omega t)\} dt = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t) \boxed{\phantom{e^{jn\omega t}}} dt$$

周期 T の実信号 $e(t)$ に対し、複素正弦波を導入し、以下のように表す

$$\text{複素フーリエ係数: } \dot{C}_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t) \boxed{\phantom{e^{jn\omega t}}} dt \quad e(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{C}_n e^{jn\omega t}$$

$|\dot{C}_n|$: $\boxed{}$ $e(t)$ に含まれる複素正弦波の大きさ

$\angle \dot{C}_n$: $\boxed{}$ $e(t)$ に含まれる複素正弦波の初期位相

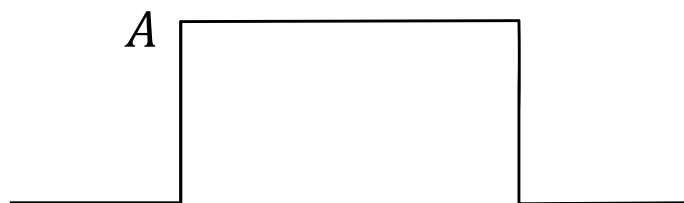
$|\dot{C}_n|^2$: $\boxed{}$ 複素正弦波の電力

単発信号

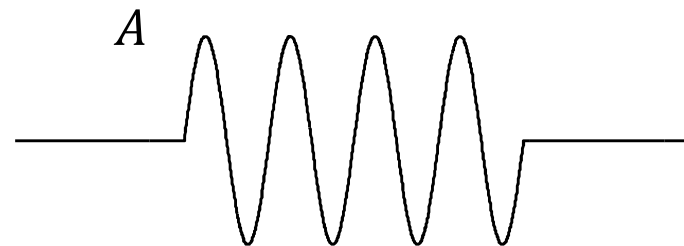
信号 $e(t)$ の2乗積分値が有限のとき、 $e(t)$ を 、 とよぶ

$$0 < \int_{-\infty}^{\infty} e(t)^2 dt < \infty$$

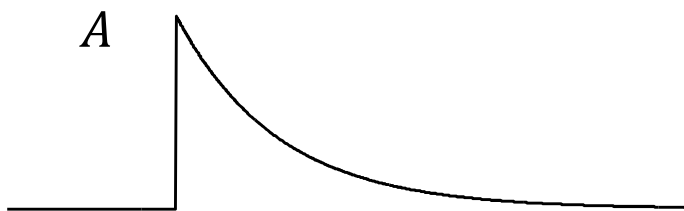
周期信号は単発信号ではない



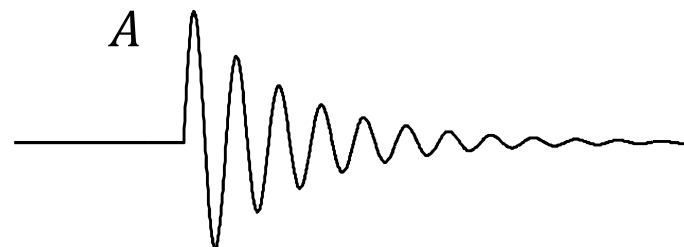
$$e(t) = \begin{cases} A & (0 \leq t \leq \tau) \\ 0 & (t < 0, t > \tau) \end{cases}$$



$$e(t) = \begin{cases} A \sin \omega t & (0 \leq t \leq \tau) \\ 0 & (t < 0, t > \tau) \end{cases}$$



$$e(t) = \begin{cases} Ae^{-\alpha t} & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$$



$$e(t) = \begin{cases} Ae^{-\alpha t} \sin \omega t & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$$

フーリエ変換

周期を無限に長くし、**単発パルス**としたスペクトルは T の ∞ への極限で表される

$$e(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{c}_n e^{jn \frac{2\pi}{T} t} = \lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e(t) e^{-\frac{jn2\pi}{T} t} dt \right) e^{\frac{jn2\pi}{T} t}$$

スペクトルの間隔 として T を Δf に置き換え、 $\Delta f \rightarrow 0$ の極限を考える

$$e(t) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\int_{-1/2\Delta f}^{1/2\Delta f} e(t) e^{-j2\pi n \Delta f t} dt \right) e^{j2\pi n \Delta f t} \Delta f$$

$$\lim_{\Delta f \rightarrow 0} \int_{-1/2\Delta f}^{1/2\Delta f} e(t) e^{-j2\pi n \Delta f t} dt = \dot{F}(f)$$



$$e(t) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{F}(f) e^{j2\pi n \Delta f t} \Delta f$$

$n\Delta f$ を f と置き、 $\Delta f \rightarrow 0$ の極限の級数和を積分に置き換えれば、

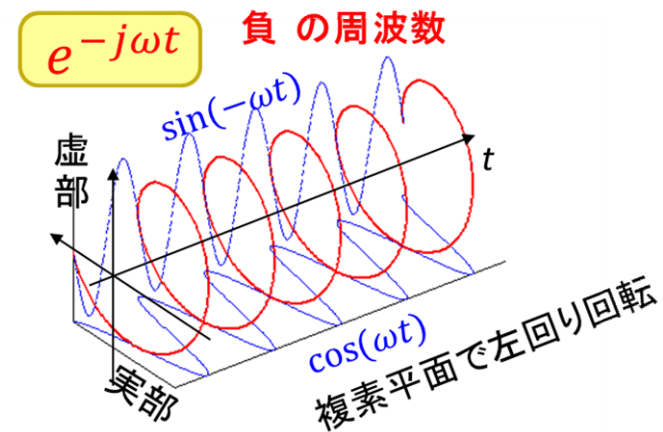
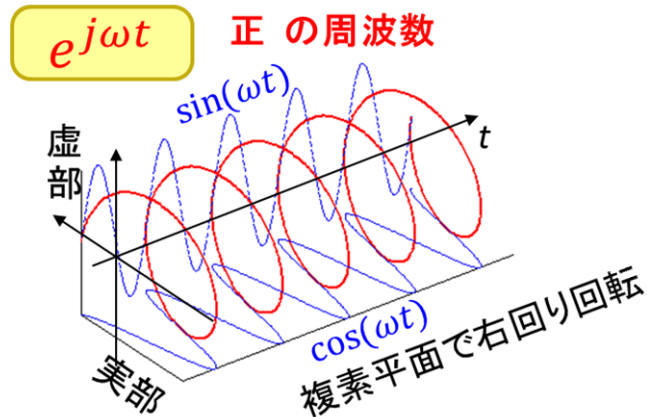
フーリエ変換 $\dot{F}(f) =$

フーリエ逆変換 $e(t) =$

$\dot{F}(f)$: フーリエスペクトル $|\dot{F}(f)|^2$: パワースペクトル $\angle F(f)$: 位相スペクトル

フーリエスペクトル

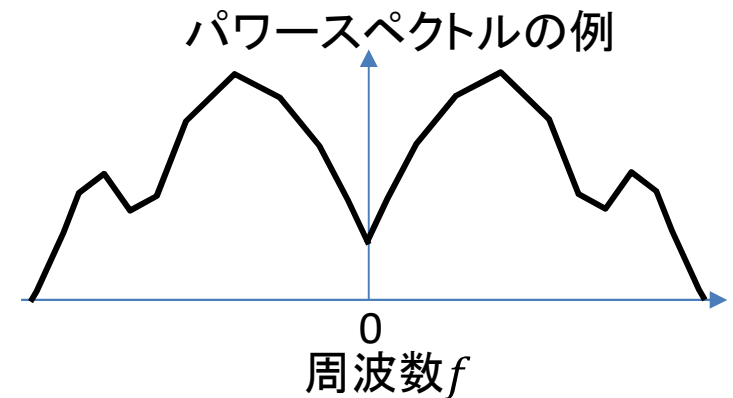
一般に、任意の波形は、右回りと左回りの複素正弦波の で表現可



フーリエスペクトル $\dot{F}(f)$ は正負の周波数 (もしくは角周波数) をもつ **複素正弦波** の大きさ A と位相 θ により $Ae^{j\theta}$ で表現でき、 とよぶ。

フーリエスペクトルは、周波数 f を用いて、一般に、 と周波数の実関数で表せる。

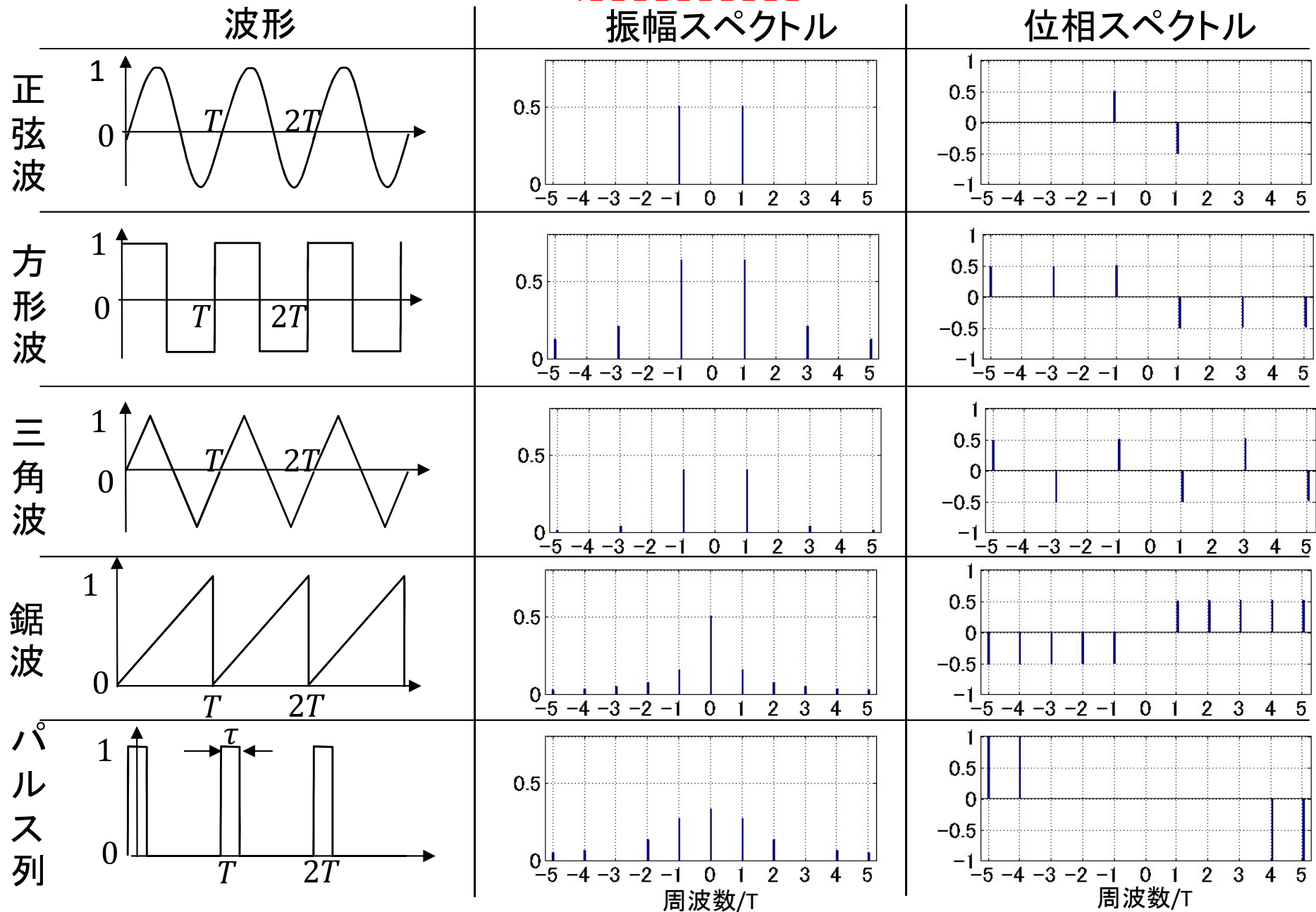
横軸を周波数として、周波数成分のパワー $A(f)^2$ や位相 $\theta(f)$ を表現したものをパワースペクトル、位相スペクトルという



実部のみの時間波形のフーリエスペクトルは、正と負で 両者の絶対値が 、位相の正負が したスペクトル (**複素共役**) となる

周期波形のフーリエスペクトル

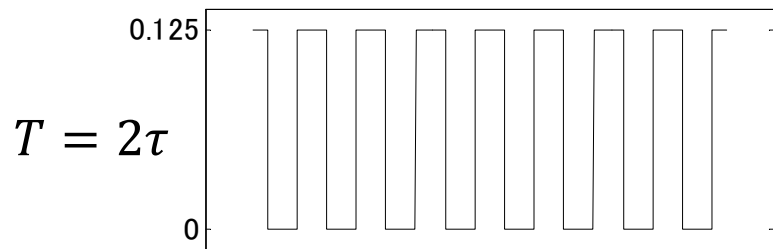
周期信号は 周波数 を示す



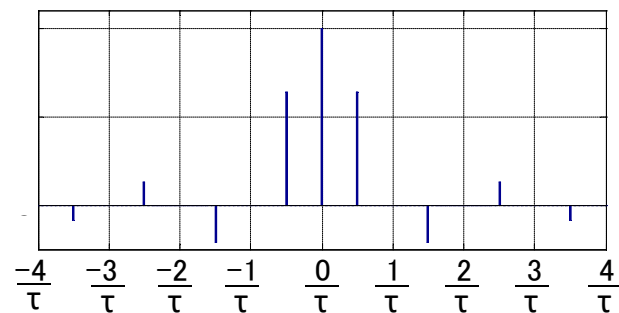
負の周波数スペクトルは正の周波数スペクトルの 逆

単発信号のフーリエスペクトル

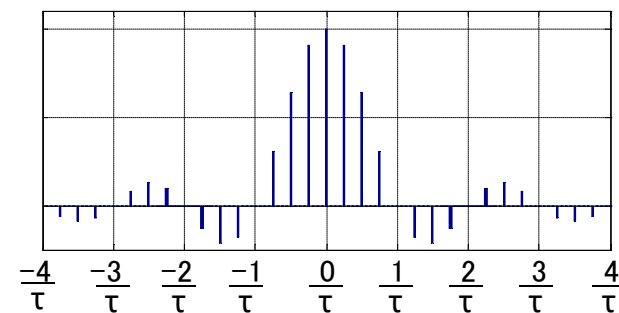
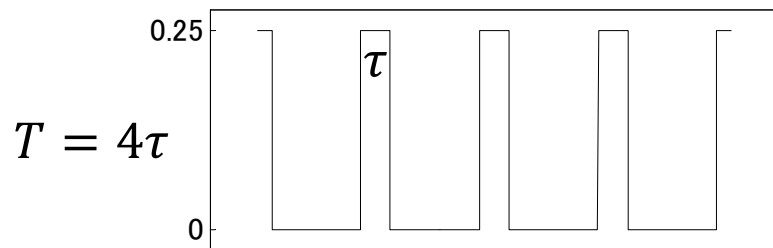
パルス幅 τ のパルス列



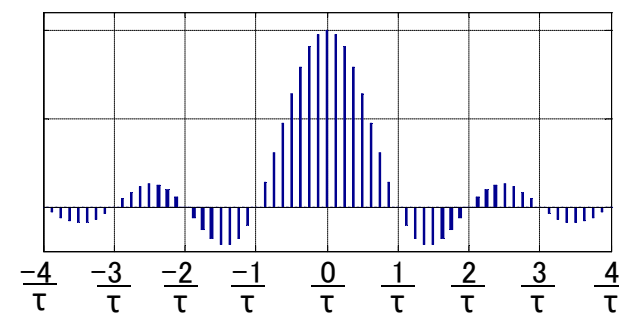
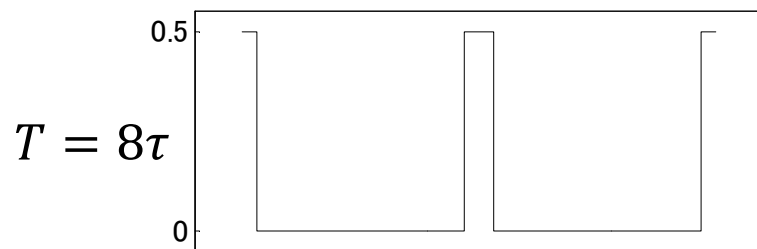
スペクトルの実部



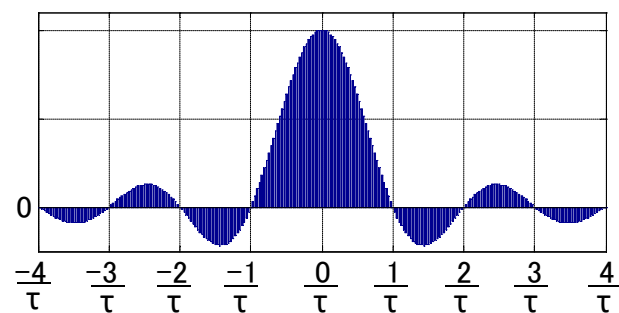
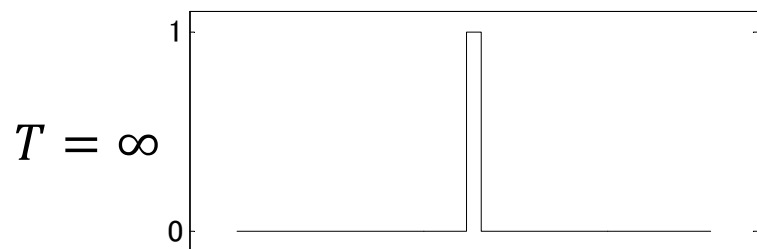
線スペクトルの間隔は
周期の



周期が長くなるとスペク
トルの間隔が



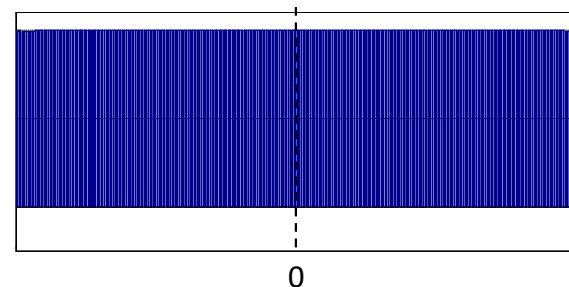
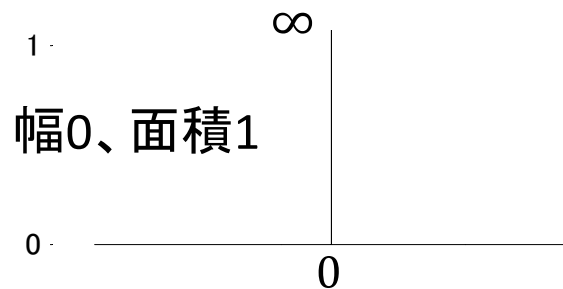
$1/\tau$ の整数倍の周波
数で



単発信号では
になる

様々なフーリエスペクトルの例

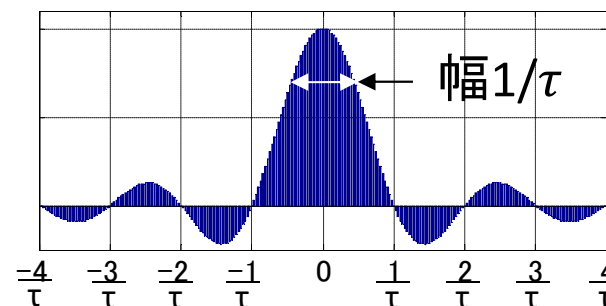
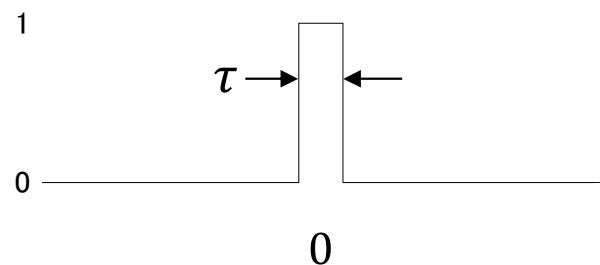
単位インパルス



あらゆる周波数
帯域を含む



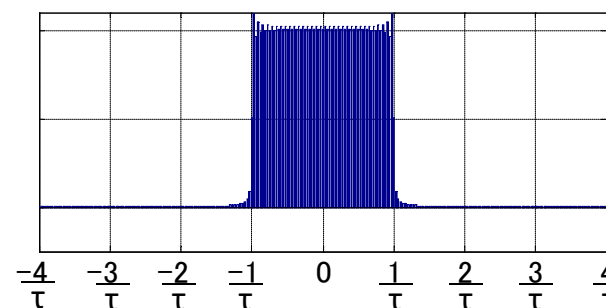
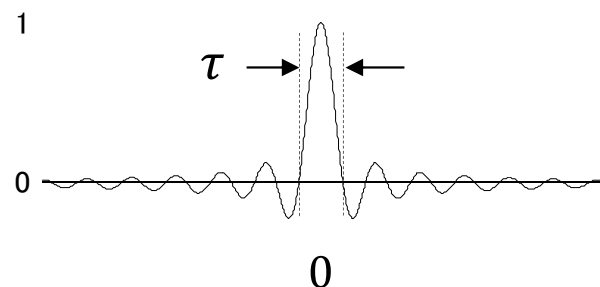
方形パルス



パルス幅が広がることで帯域幅が狭まる



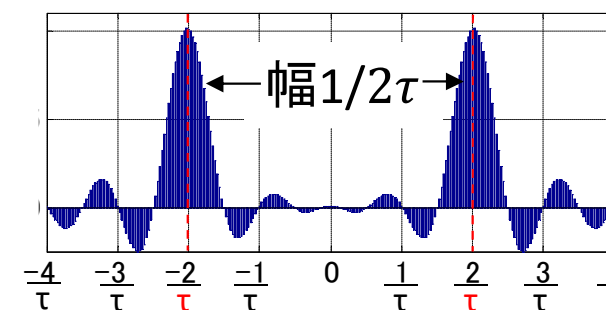
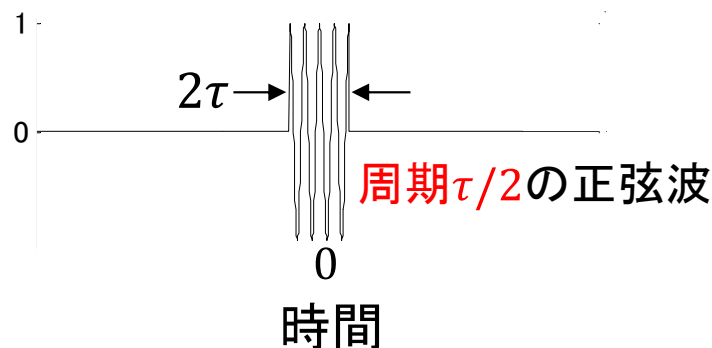
SINCパルス



急激な



トーンバースト波



方形パルスのスペクトルが正弦波の周波数に



周波数

フーリエ変換の性質

波形の移動

$$e(t - \tau) \Leftrightarrow \dot{F}(f)e^{-j2\pi f\tau}$$

時間波形の移動は元のスペクトルに 位相回転項(周波数に比例)のみが乗ぜられる
振幅スペクトルは変化しない

波形の拡大縮小

$$e(\alpha t) \Leftrightarrow \dot{F}\left(\frac{f}{\alpha}\right)$$

時間波形の時間軸の拡大(縮小)は
スペクトルの周波数軸の と等価
相対的なスペクトルの形状は変化しない

波形の微分

$$\frac{d}{dt}e(t) \Leftrightarrow j2\pi f\dot{F}(f)$$

スペクトルへの周波数の と等価、高周波ほど振幅が大きくなる。時間波形の微分は時間変化が **速い** ほど強調されることと対応

波形の積分

$$\int_{-\infty}^t e(t) dt \Leftrightarrow \frac{\dot{F}(f)}{j2\pi f}$$

スペクトルへの周波数の と等価、高周波ほど振幅が小さくなる。時間波形の積分は波形が滑らかになっていくことに対応

フーリエ変換の演算の性質

波形の線形和

$$\alpha_1 e_1(t) + \alpha_2 e_2(t) \Leftrightarrow \alpha_1 \dot{F}_1(f) + \alpha_2 \dot{F}_2(f)$$

時間波形の線形和のフーリエ変換はそれらのスペクトルの線形和
フーリエ変換は線形演算であり、信号の が成り立つ

波形の畳み込み積分

$$\int_{-\infty}^{\infty} e_1(t - \tau) e_2(\tau) d\tau \Leftrightarrow \dot{F}_1(f) \dot{F}_2(f)$$

時間波形の畳み込み積分のフーリエ変換はそれらの 、システムの応答
は入力信号のスペクトルとシステムの伝達関数の積で表される。

波形の乗算

$$e_1(t) e_2(t) \Leftrightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \dot{F}_1(f - \xi) \dot{F}_2(\xi) d\xi$$

時間波形の積のフーリエ変換はそれらのスペクトルの
波形の積は、計測においてミキサ回路や周波数変調においてよく利用される

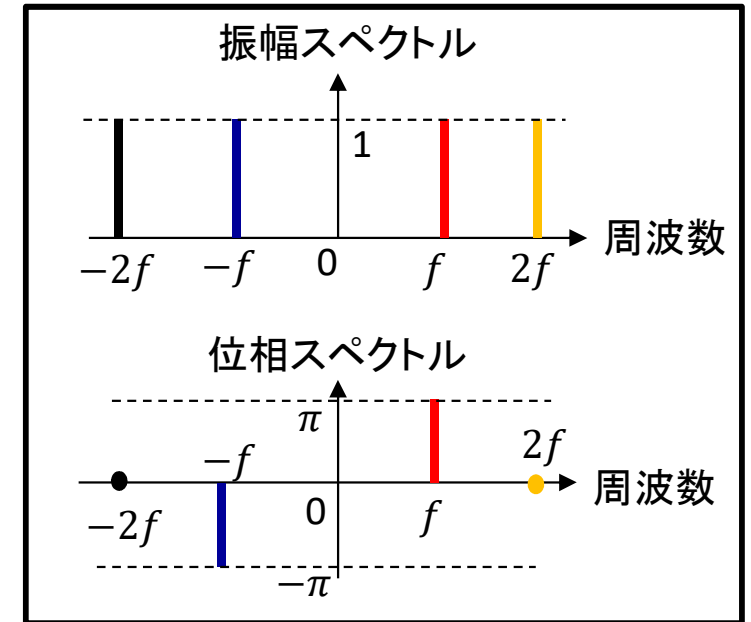
$$e_1(t) \cos 2\pi f_0 t = e_1(t) \frac{e^{j2\pi f_0 t} + e^{-j2\pi f_0 t}}{2} \Leftrightarrow \frac{\dot{F}_1(f - f_0) + \dot{F}_1(f + f_0)}{2}$$

時間波形の正弦波の乗算は、フーリエスペクトルの に対応

第5回復習テスト

右図のようなフーリエスペクトルを持つ周期信号波形について以下の問いに答えよ

1. この信号波形の基本周期を示せ
2. 赤と青で表される周波数の複素スペクトル成分を求めよ
3. 赤と青の線スペクトルで表される合成波の時間波形を f を使って表せ
4. 橙色の線スペクトルで示される複素波形の概形を図示せよ



電気電子計測

第6回 素子の雑音と等価回路

電気・電子計測では計測系内外からいろいろな雑音(Noise)が必ず混入し、いろいろな影響を及ぼす。

雑音といっても音だけではなく、欲しい信号以外の不要な信号は全て雑音と呼ぶ。

計測における多くの問題はこれら雑音の影響を取り除くことに集約される。

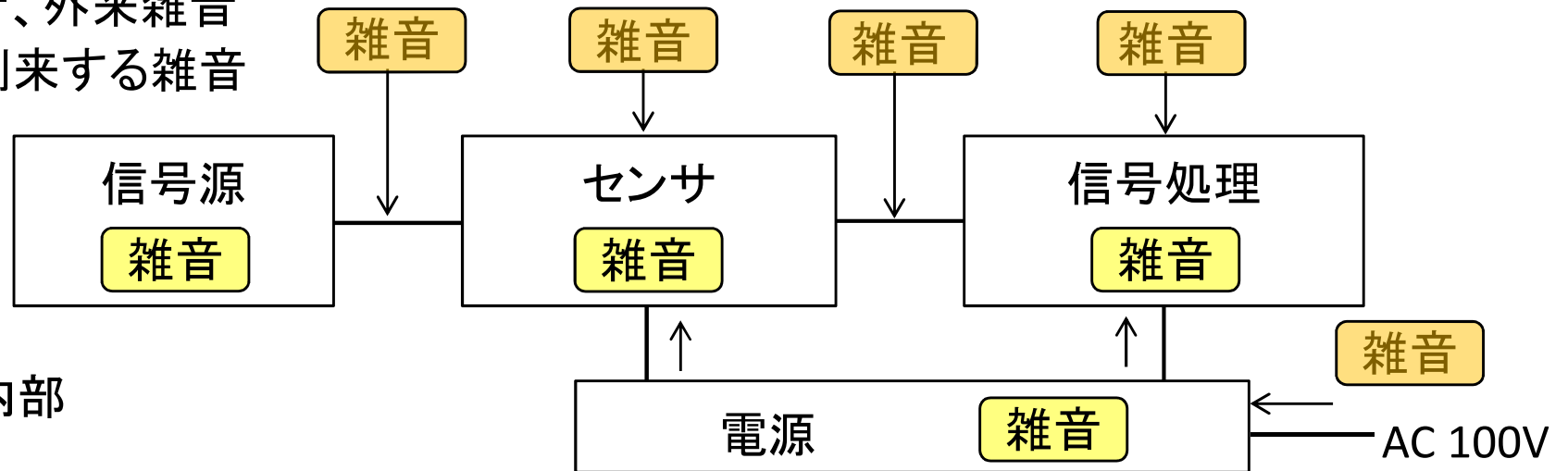
ここでは、雑音の種類、性質について学ぶ

雑音の定義

雑音(Noise) 「所要の信号に干渉し、不明確にする望ましくない擾乱」

雑音 外部雑音、外来雑音
計測系外部から到来する雑音

雑音 内部雑音
信号源や計測系内部
で発生する雑音



雑音はあらゆる[]で、あらゆる[]で混入する

(1) [] (測定できる信号レベルの下限值)の制限
測定できる最小レベルの測定値が雑音レベルに埋もれてしまうと測定値の精度は低下する

(2) [] (測定できる最大レベルと最小レベルの比)の制限
最大レベルは電源電圧や素子の耐圧で決まる。
最小レベルは雑音で決まるので、ダイナミックレンジが制限される

(3) 回路の誤動作の誘起
インパルス状のノイズは論理回路、コンピュータなどのデジタル機器を誤動作させる可能性

雑音の種類

信号源や素子内の物理現象に伴い本質的に発生 : 熱雑音、熱起電力、 $1/f$ 雑音

自然現象に伴い発生 : 雷、宇宙雑音、太陽雑音、地電流

人工的に発生 : 商用交流電源、自動車、高周波機器、電力線、デジタル回路

理論的に発生 : AD変換の量子化雑音、波形記録の際のタイミングずれ(ジッター)

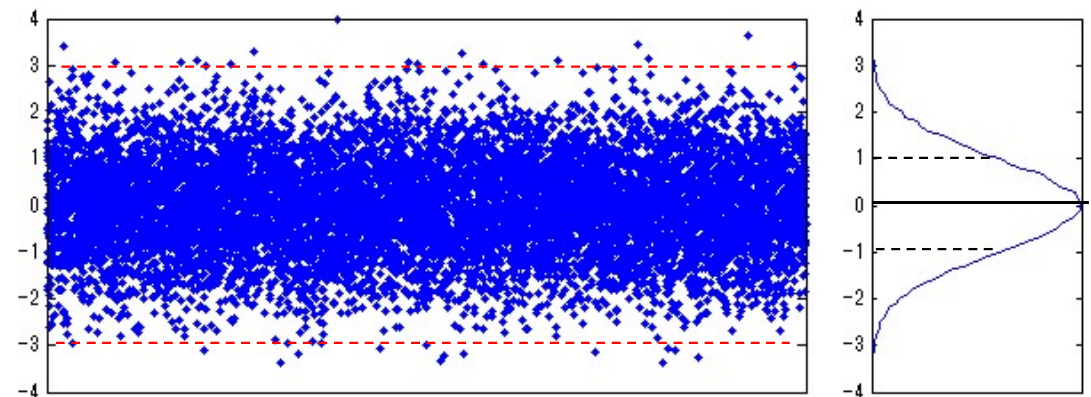
熱雑音 (Johnson雑音、Nyquist雑音)

熱励起された導体中のキャリアの 無秩序運動 に起因。
導体に不規則に発生する多数の微小電流パルスの集合。

波形は振幅、位相共に不規則であり、瞬時値は予測不能(ガウス雑音 の一種)

振幅の瞬時値の確率密度分布は ガウス 分布に従う(ガウス雑音)

振幅の瞬時値の99.7%がその標準偏差 ± 3 倍以内に入る



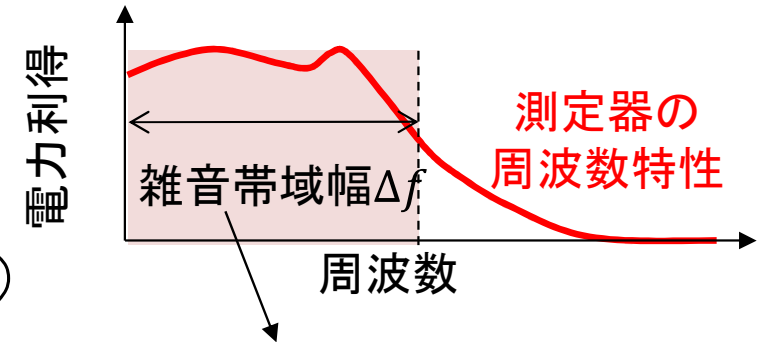
標準偏差1のガウス雑音

熱雑音の特徴

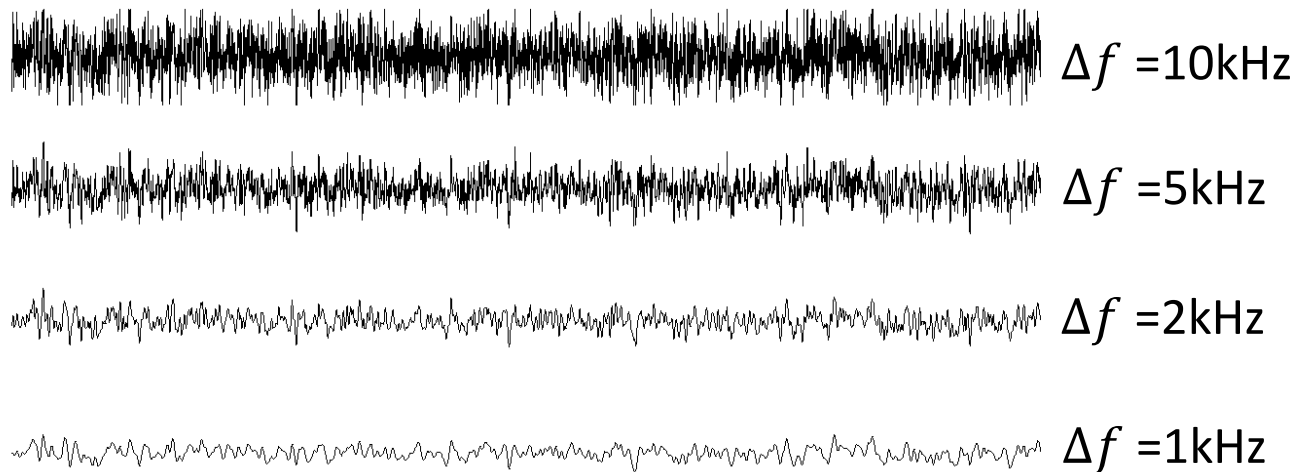
熱雑音の有能電力 $N_t =$

T : 絶対温度 (K) Δf : 測定系の帯域幅[Hz] k : ボルツマン定数 1.38×10^{-23}

- ・計測システムに必ず混入
- ・絶対温度に比例する
高感度カメラでは撮像素子を冷却し、高感度化
- ・雑音電力は確率的に周波数によらず (白色雑音)
- ・計測される熱雑音はある周波数帯域が制限された測定系を通過しているためその に比例する



利得の最大値が等しく、面積が等しい長方形の幅



帯域幅を1/10
↓
熱雑音電力1/10
↓
熱雑音振幅

高い周波数は速い時間変動の情報を含む。対象の を知ろうとすればするほど熱雑音が大きくなる。対象の時間変動を測定可能な最低限の帯域を選ぶ

1/f 雑音の特徴

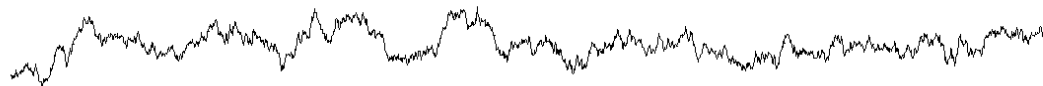
1/f 雑音の有能電力 $N_f = \int_{f_l}^{f_h} \frac{K}{f} df =$ $\Delta f = f_h - f_l$
 K : 比例定数

不規則雑音の一種

そのスペクトルは周波数に して小さくなる。(熱雑音は周波数に対して一定)

あらゆる現象が持つゆらぎに起因

発振器の発振周波数、抵抗器の抵抗値の雑音、接触抵抗の雑音、半導体素子の発生する雑音で見られる



$\Delta f = 10\text{kHz}$



$\Delta f = 1\text{kHz}$



$\Delta f = 100\text{Hz}$



$\Delta f = 10\text{Hz}$

帯域幅を1/10



1/f 雑音電力は
1/10より

直流を含む の測定で問題になることが多い

ショット雑音の特徴

ショット雑音の電流の実効値 I_{sh}

$$I_{sh}^2 =$$

q : 電子の電荷量 (1.6×10^{-19} C)

I_{DC} : 直流電流

Δf : 測定系帯域幅

トランジスタ、ダイオード、真空管などの電子デバイスにおいて観測される不規則雑音

それらに流れる電流が多数の荷電粒子の移動によることに起因

ショット雑音はその雑音電力が に比例する

白色雑音の一種であり、雑音電力は に比例する

熱起電力

異なった種類の金属を接触させると、熱起電力が生じ、これが直流の雑音となりうる

熱起電力が測定に影響するような場合には、測定系の各接点間温度差をできる限り小さくすることが重要

抵抗の雑音

多くの場合、センサ等の信号源の等価回路は電圧源とそれに直列の電源抵抗で表される。

抵抗の熱雑音

電源抵抗 R の電源の有能電力 $N_t = \frac{E_t^2}{4R}$ E_t : 雑音電圧の実効値

$N_t = kT\Delta f$ より、熱雑音の実効値 $E_t =$

抵抗熱雑音の実効値は、抵抗値、帯域幅の平方根に比例する

1k Ω の抵抗の熱雑音の大きさ 約4 μ V (帯域幅1MHz)

一般に抵抗は、上式以上の雑音が発生(過剰雑音)

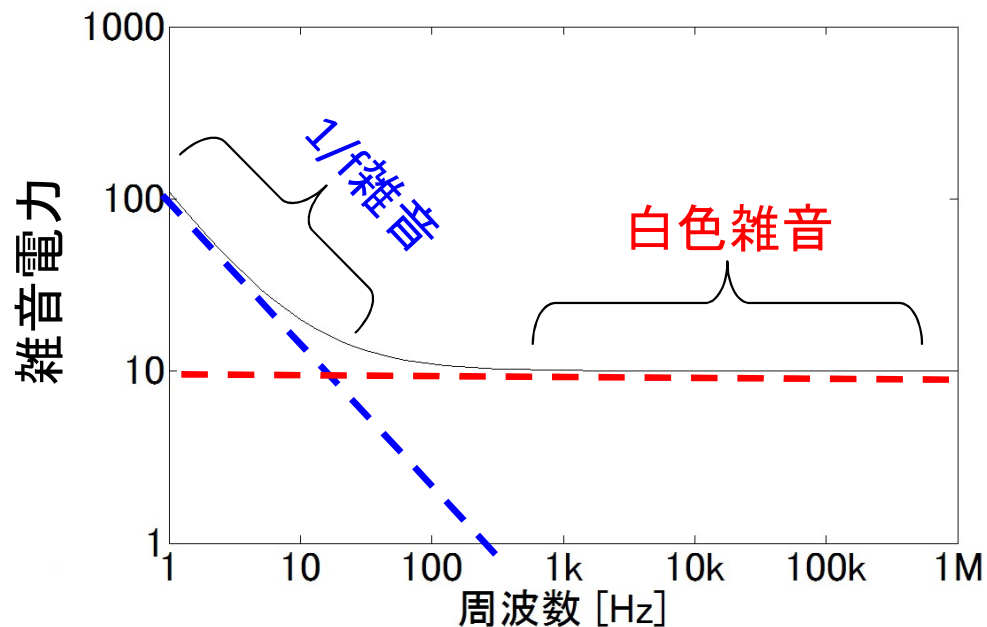
過剰雑音の実効値 $E_{ex} = \sqrt{\frac{K}{f}} I_{DC} R$

K : 定数 (炭素ソリッド抵抗 > 炭素被膜抵抗 > 、巻線抵抗)

過剰雑音は抵抗の種類により小さくできる

電子素子、電子回路の雑音

ダイオードや、トランジスタ等の電子素子ではショット雑音が発生
その等価回路の抵抗分からは熱雑音や $1/f$ 雑音が発生
電子回路もその抵抗、コンデンサ、インダクタンスなどから雑音が発生
電源からも雑音が発生する



一般の電子素子等の雑音特性の例

10Hz以下 が卓越

100Hz以上 が卓越

電子素子の雑音特性はデータシートに記されている

入力がゼロにもかかわらず、直流が出力される
オフセットが時間とともに変化する が発生することがある

雑音の単位とパラメータ

実効値 振幅の2乗平均値の平方根、振幅と同じ次元を持つ
白色雑音電圧の実効値 E_t は $\sqrt{\Delta f}$ に比例
帯域幅が決まらなると白色雑音の大きさを表せない。
単位帯域幅あたりの雑音実効値 $E_t/\sqrt{\Delta f}$ [V/ $\sqrt{\text{Hz}}$] も用いられる。

SN比 信号の雑音に対する大きさを表す量。(SNR、Signal to Noise Ratio)
信号の比を考えると、計測では実効値ではなく 電力比 (実効値の2乗) を使う
単位はデシベル。SN比の掛け算、割り算がデシベルの足し算、引き算に対応

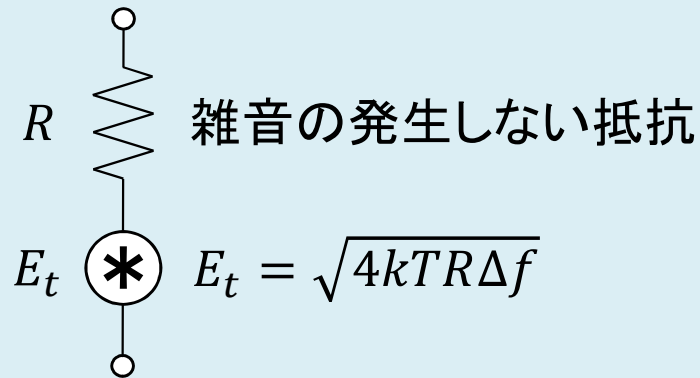
$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{\text{信号電力}}{\text{雑音電力}} = 20 \log_{10} \left[\frac{\text{振幅比}}{\text{電力比}} \right] \text{ [dB]}$$

振幅比	1倍	1.4倍	2倍	3.2倍	5倍	10倍	SN比が大きいほど 信号が良質である ことを表す
電力比	1倍	2倍	4倍	10倍	25倍	100倍	
デシベル	0 [dB]	3 [dB]	6 [dB]	10 [dB]	14 [dB]	20 [dB]	

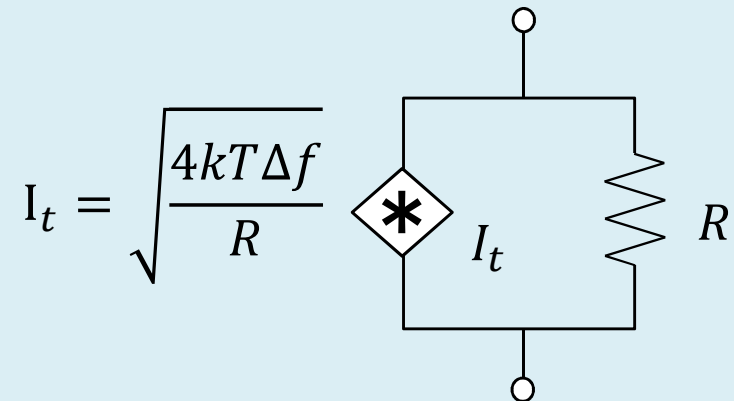
実用的には振幅比は「〇倍」といった表現も使われるが、デシベルで表す。
デシベル表記では、振幅比の2乗の**電力比**で表現するのが一般的
上の表の1列目と3列目が使われるので、対応を完全に暗記しておくこと

抵抗が発生する雑音の等価回路

電圧源による等価回路

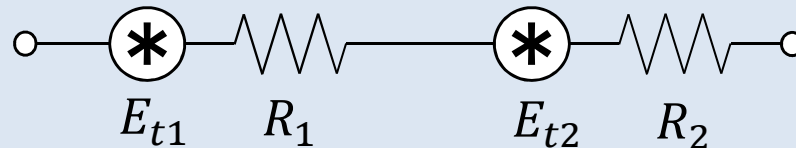


電流源による等価回路



直列な二つの抵抗の場合

$$E_{t1} = \sqrt{\langle e_{t1}(t)^2 \rangle}$$

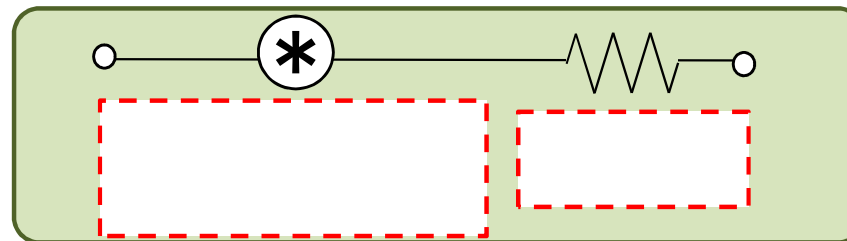
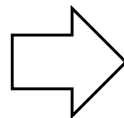


二つの抵抗の発生する
雑音の電力は??

ガウス雑音の瞬時値は互いに**無相関**なので、 $e_{t1}(t)e_{t2}(t)$ の
 $\langle \{e_{t1}(t) + e_{t2}(t)\}^2 \rangle = \langle e_{t1}(t)^2 + 2e_{t1}(t)e_{t2}(t) + e_{t2}(t)^2 \rangle = \langle e_{t1}(t)^2 \rangle + \langle e_{t2}(t)^2 \rangle$

二つの抵抗の発生する雑音の合成電力は**各熱雑音の**

等価回路は



雑音対策

熱雑音

信号源抵抗、計測回路に用いられる の値を小さくする。

計測系の を狭くする

信号源並びに計測回路の 下げる

白色雑音なので、同期加算(アベレージング)などの信号処理を適用する

1/f 雑音

信号源抵抗、計測回路に用いられる の値を小さくする。

計測系の を狭くする

低い周波数の信号を に変換する

ショット雑音

雑音の少ない素子を選ぶ

抵抗に流す電流を少なくする

第6回復習テスト

1. 熱雑音の特徴について以下の a~d に適切な語句を記せ

時間波形はランダムであり、 分布に従う

統計的にはあらゆる周波数についてそのパワーは である

熱雑音の有能電力は測定器の測定帯域幅に する

絶対温度を半分、帯域幅を10倍にすると熱雑音の有能電力は約 dB 増加する

2. 以下の文章に間違いがあれば、訂正せよ

e. 電子回路の雑音は、主に周波数が高くなると $1/f$ 雑音が卓越する

f. 増幅器の雑音指数は[入力雑音のSN比 / 出力雑音のSN比]であり、0dBより大きい

g. 誘導雑音対策にはインピーダンス変換により信号源インピーダンスを大きくするほうがよい