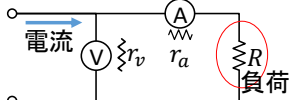


前回の復習: 電圧降下法による抵抗の測定:

負荷抵抗が大きい場合



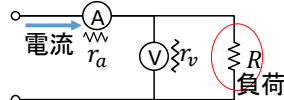
$R \gg r_v$ の場合は、ほとんどの電流は電圧計側に流れる。降下は、電流計の内部抵抗 r_a によって、負荷 R に流れる電流を正しく測定するためには、電圧計より右側に電流計を入れる。

$$(R + r_a)I = V, \quad I = \frac{V}{R + r_a} = \frac{V}{R} \cdot \frac{R}{R + r_a} = \frac{V}{R} \cdot \frac{R^2}{R^2 + Rr_a + r_a^2}$$

一般的に r_v は大きい(数MΩ以上)、 r_a は小さい(数Ω以下)

※ $r_v \gg R \gg r_a$ の場合はどちらでも良い。

負荷抵抗が小さい場合



$R \ll r_a$ の場合は、主な電圧降下は、電流計の内部抵抗 r_a によって、負荷 R に流れる電流を正しく測定するためには、電圧計より右側に電流計を入れる。

$$(R + r_a)I = V, \quad I = \frac{V}{R + r_a} = \frac{V}{R} \cdot \frac{R}{R + r_a} = \frac{V}{R} \cdot \frac{R^2}{R^2 + Rr_a + r_a^2}$$

前回の復習: 交流電圧を表すパラメータ:

交流電圧の表現

(交流電流の場合は式中の V を I に変える。)

1. 実効値: 交流電圧の2乗の時間平均の平方根

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} = \frac{v_0}{\sqrt{2}}$$

2. 平均値: 交流電圧の絶対値の平均

$$V'_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T |v(t)| dt = \frac{2v_0}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{rms}$$

3. ピーク値: 交流電圧の最大値(すなわち振幅)

$$V_p = \max v(t) = v_0$$

前回の復習: 種々の交流電力の定義:

・ 瞬時電力: 時々刻々の電力の大きさ

$$p(t) = v(t)i(t) = v_0 \cos \omega t i_0 \cos(\omega t + \theta)$$

・ 平均電力または実効電力: 瞬時電力の時間平均

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{v_0 i_0}{2} \cos \theta = V_{rms} I_{rms} \cos \theta$$

$$V_{rms} = \frac{v_0}{\sqrt{2}}, \quad I_{rms} = \frac{i_0}{\sqrt{2}}$$

・ 無効電力: 平均化された仕事をしない電力

$$P_r = V_{rms} I_{rms} \sin \theta$$

・ 皮相電力: 見かけ上の電力

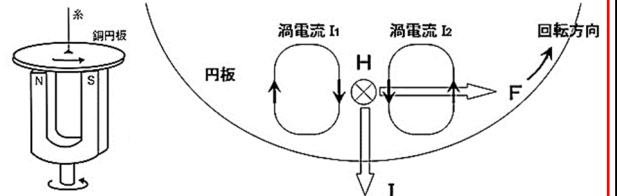
$$V_{rms} I_{rms}$$

・ 力率: 皮相電力と実効電力の割合

$$\cos \theta$$

積算電力計の原理I (アラゴの円板): 概略のみ説明。

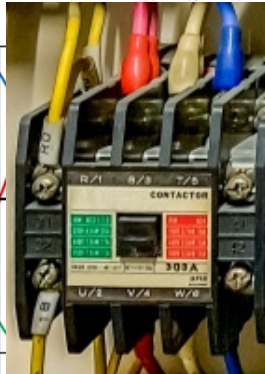
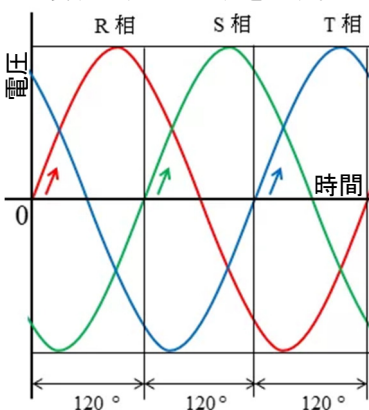
右下図のように静止銅円板に上から下方向の回転磁束 H が印加されていると、その左側は次の瞬間に磁束 H が減少するので、レンツの法則より H が増加するように渦電流 I_1 が流れる。逆に右側では H が増加するので減少するように渦電流 I_2 が流れる。結果的にフレミングの左手の法則で円板に対して回転方向に力が働く。従って、左下図で銅円板の下に置いた磁石を回転させると銅円板もそれにつれて回りだす。



図は永久磁石の用途・応用シリーズ(9)より転載
http://www.neomag.jp/mailmagazines/200802/letter200802.html

3相交流とは?: R相:赤、S相:白、T相:黒or青で、位相が120度ずつずれた交流を示す。

R相 S相 T相



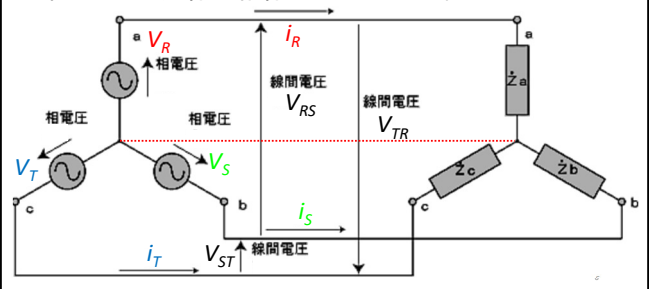
負荷側: U相 V相 W相

Y結線の3相交流:

・ R,S,Tはそれぞれ120度ずつずれた位相を持つ。

・ R,S,Tの3電源からの電流の和は常に0となるので、N点と負荷の中心点を仮に結線(赤点線で表示)したとしても、そこには電流は流れない。($i_R + i_S + i_T = 0$)

・ 従ってこの点線の結線は無くてもよい。



3相交流での線間電圧:

$$V_R(t) = v_0 \sin \omega t, \quad V_S(t) = v_0 \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right),$$

$$V_T(t) = v_0 \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right),$$

として線間電圧 $V_{RS} = V_R - V_S$ を計算してみると、

$$\begin{aligned} V_R - V_S &= v_0 \left\{ \sin \omega t - \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right\} \\ &= v_0 \left\{ \sin \omega t - \sin \omega t \cos \frac{2\pi}{3} + \cos \omega t \sin \frac{2\pi}{3} \right\} \\ &= v_0 \left\{ \sin \omega t + \frac{1}{2} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \right\} \end{aligned}$$

7

$$\begin{aligned} V_R - V_S &= v_0 \left\{ \frac{3}{2} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \right\} \\ &= \sqrt{3} v_0 \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \omega t + \frac{1}{2} \cos \omega t \right\} \\ &= \sqrt{3} v_0 \left\{ \sin \omega t \cos \frac{\pi}{6} + \cos \omega t \sin \frac{\pi}{6} \right\} \\ &= \sqrt{3} v_0 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right), \end{aligned}$$

となるので、

$$|V_{RS}| = |V_R - V_S| = \sqrt{3} v_0$$

となり、各線間電圧は各相電圧 v_0 の $\sqrt{3}$ 倍となる。

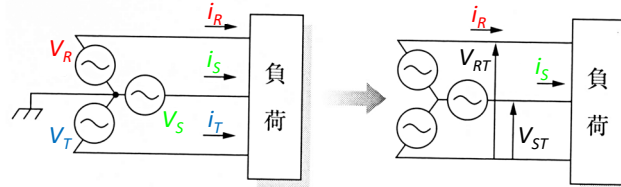
8

3相交流の電力測定:

三相交流の電力 P は、下左図の様に各相の電圧・電流を測定して各々電力を求め、加算すればよい。

または、3相のうちの1つを基準にして他の2相の電圧・電流を測定して電力を求めて加算しても求められる。

$$\begin{aligned} P &= V_R i_R + V_S i_S + V_T i_T = V_R i_R + V_S i_S - V_T (i_R + i_S) \\ &= (V_R - V_T) i_R + (V_S - V_T) i_S = V_{RT} i_R + V_{ST} i_S, \\ &\quad (i_R + i_S + i_T = 0) \end{aligned}$$

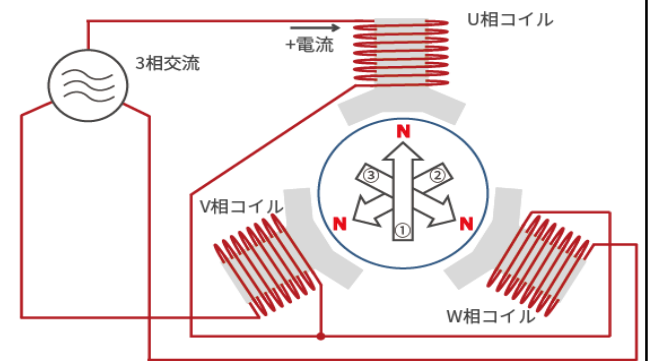


9

3相誘導電動機:

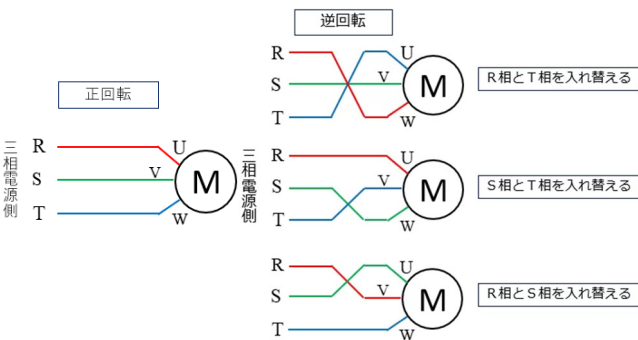
永久磁石、ブラシ、位置検出等が不要。

原理はアラゴの円板とほぼ同じ。



3相電動機の回転方向:

任意の2相を入れ替えると逆回転になる。



インピーダンスの計測:

コンデンサによるキャパシタンス C 、あるいはコイルによるインダクタンス L が回路に存在するとき、単なる抵抗 R とは異なり、印加される交流電圧と交流電流に位相差が生まれる。この時、インピーダンスは複素量で表現され、計測値は2つの値(実部と虚部)を持つ。

($\cdot$ が上に付いている変数は複素数)

$$\text{インピーダンス: } \dot{Z} \equiv R_s + jX_s, \\ (R_s: \text{等価抵抗}, X_s: \text{等価リアクタンス})$$

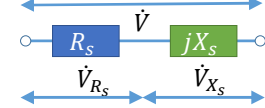
インピーダンスの逆数を **アドミタンス** と呼ぶ。

$$\text{アドミタンス: } \dot{Y} \equiv G_p + jB_p = \frac{1}{\dot{Z}} \equiv \frac{1}{R_p} + \frac{1}{jX_p}, \\ (G_p: \text{電導度}, \text{コンダクタンス}, B_p: \text{サセプタンス})$$

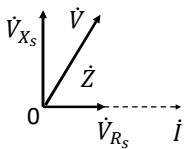
12

インピーダンスのベクトル表現:

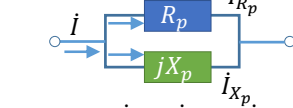
・直列接続



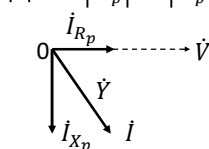
$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{I}\dot{Z} = \dot{I}\dot{R}_s + j\dot{I}X_s \\ &\equiv \dot{V}_{R_s} + j\dot{V}_{X_s}, \\ |\dot{V}|^2 &= |\dot{V}_{R_s}|^2 + |\dot{V}_{X_s}|^2\end{aligned}$$



・並列接続



$$\begin{aligned}\dot{I} &= \dot{V}\dot{Y} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{\dot{V}}{R_p} - j\frac{\dot{V}}{X_p} \\ &\equiv \dot{I}_{R_p} - j\dot{I}_{X_p}, \\ |\dot{I}|^2 &= |\dot{I}_{R_p}|^2 + |\dot{I}_{X_p}|^2\end{aligned}$$



各パラメータ間の関係:

インピーダンス $\dot{Z}$ とアドミタンス $\dot{Y}$ の R_s, R_p, X_s, X_p 間の関係は、

$$\begin{aligned}R_s + jX_s &= \left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{jX_p}\right)^{-1} = \frac{jR_pX_p}{R_p + jX_p} \\ &= \frac{jR_pX_p(R_p - jX_p)}{R_p^2 + X_p^2} = \frac{R_pX_p^2 + jR_p^2X_p}{R_p^2 + X_p^2}, \text{ より、}\end{aligned}$$

$$R_s = \frac{R_pX_p^2}{R_p^2 + X_p^2}, \quad X_s = \frac{R_p^2X_p}{R_p^2 + X_p^2}, \quad \text{となる。また逆に、}$$

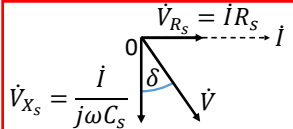
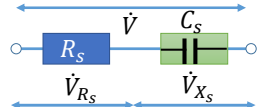
$$\frac{1}{R_p} + \frac{1}{jX_p} = \frac{1}{R_s + jX_s} = \frac{R_s - jX_s}{R_s^2 + X_s^2}, \quad \text{より、}$$

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s}, \quad X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s}, \quad \text{となる。}$$

誘導リアクタンスの単位: $j\omega L [\Omega]$ 、 L の単位: $[H]$ ヘンリー
容量リアクタンスの単位: $1/j\omega C [\Omega]$ 、 C の単位: $[F]$ ファラド

容量リアクタンス素子(コンデンサ)の電力損失: (補正)

現実のコンデンサでは等価直列抵抗(ESR: Equivalent Series Resistance)があるので誘電損失が発生する。



誘電正接: $\tan \delta = |\dot{V}_{R_s}|/|\dot{V}_{X_s}| = \omega C_s R_s$,

$$\begin{aligned}\text{インピーダンス: } \dot{Z} &= R_s + \frac{1}{j\omega C_s} = R_s \left(1 + \frac{1}{j \tan \delta}\right) \\ &= R_s \left(1 + \frac{\cos \delta}{j \sin \delta}\right) = \frac{R_s}{j \sin \delta} (j \sin \delta + \cos \delta) = \frac{-jR_s}{\sin \delta} e^{j\delta} \\ &= e^{-j\frac{\pi}{2}} \frac{R_s}{\sin \delta} \frac{|\dot{V}|}{|\dot{I}|} e^{j\delta} = \frac{|\dot{V}|}{|\dot{I}|} e^{j(\delta - \frac{\pi}{2})},\end{aligned}$$

誘電損失(DF: Dissipation factor):

$\dot{I} = |\dot{I}|e^{j\omega t}$, $I = \text{Re}(\dot{I}) = |\dot{I}| \cos \omega t$, とすると、

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{Z}\dot{I} = \left(R_s + \frac{1}{j\omega C_s}\right) |\dot{I}| e^{j\omega t} = \frac{|\dot{V}|}{|\dot{I}|} e^{j(\delta - \frac{\pi}{2})} |\dot{I}| e^{j\omega t} \\ &= |\dot{V}| e^{j(\omega t + \delta - \frac{\pi}{2})},\end{aligned}$$

となるので、

$$\begin{aligned}V &= \text{Re}(\dot{V}) = \text{Re}(|\dot{V}| e^{j(\omega t + \delta - \frac{\pi}{2})}) \\ &= |\dot{V}| \cos\left(\omega t + \delta - \frac{\pi}{2}\right) = |\dot{V}| \sin(\omega t + \delta),\end{aligned}$$

となり、誘電損失DFは、($s \equiv \omega t$)

$$\text{DF} = \frac{1}{T} \int_0^T V I dt = \frac{1}{T} \int_0^T |\dot{V}| \sin(\omega t + \delta) |\dot{I}| \cos \omega t dt$$

$$\begin{aligned}\text{DF} &= \frac{|\dot{V}| |\dot{I}|}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin(s + \delta) \cos s ds \quad (s \equiv \omega t) \\ &= \frac{|\dot{V}| |\dot{I}|}{2\pi} \int_0^{2\pi} \{\sin s \cos \delta + \cos s \sin \delta\} \cos s ds \\ &= \frac{|\dot{V}| |\dot{I}| \sin \delta}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 s ds \\ &= \frac{|\dot{V}| |\dot{I}| \sin \delta}{4\pi} \int_0^{2\pi} (1 + \cos 2s) ds = \frac{|\dot{V}| |\dot{I}| \sin \delta}{2} \\ &= \left(\frac{|\dot{V}|}{\sqrt{2}}\right) \left(\frac{|\dot{I}|}{\sqrt{2}}\right) \sin \delta = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \sin \delta,\end{aligned}$$

となる。

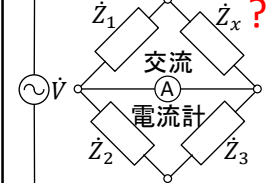
注意) 電流と電圧の位相差は、 $\delta - \frac{\pi}{2}$ なので、DFは実効電力に相当する。

交流ブリッジによるインピーダンス計測:

インピーダンス計測は、実部と虚部または振幅と位相を測定しなければならない。

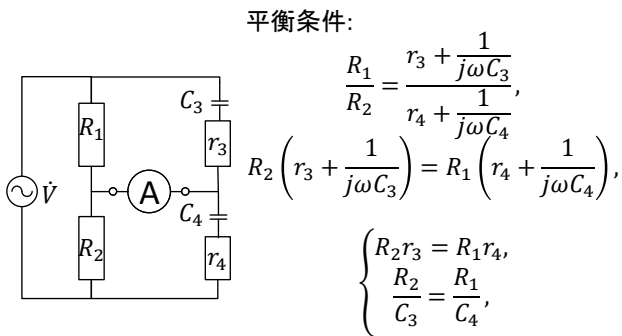
⇒必然的に交流を用いた計測となる【交流ブリッジ】

平衡条件(交流電流計に電流が流れない条件):



$$\begin{aligned}\frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} &= \frac{\dot{Z}_x}{\dot{Z}_x + \dot{Z}_3}, \\ \dot{Z}_1(\dot{Z}_x + \dot{Z}_3) &= \dot{Z}_x(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2), \\ \dot{Z}_1\dot{Z}_3 &= \dot{Z}_x\dot{Z}_2, \\ \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_2} &= \frac{\dot{Z}_x}{\dot{Z}_3}, \quad \dot{Z}_x = \frac{\dot{Z}_1\dot{Z}_3}{\dot{Z}_2},\end{aligned}$$

直列容量ブリッジの例:



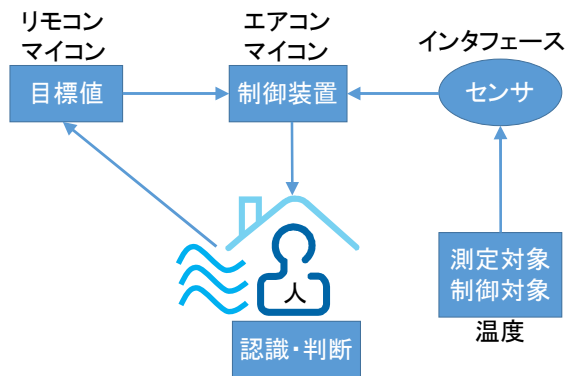
19

人間の感覚とセンサ:

人間の器官	人間の感覚	センサの種類	センサ素子の例
目	視覚	光センサ	フォトダイオード、CCD
耳	聴覚	音響センサ	圧電素子、マイクロフォン
皮膚	触覚	振動センサ、圧力センサ、温度センサ	圧電素子、ひずみゲージ、サーミスタ、焦電素子
舌	味覚	味覚センサ	ISFET(Ion Sensitive FET),
鼻	嗅覚	においセンサ	セラミックス素子

20

センサの役割: エアコンの例



21

インテリジェントセンサ(スマートセンサ):

- 測定対象を電気量に変換するだけでなく、局所的な分散処理により信号処理を効率化する目的で開発された
- 主な特徴: 基本的に"賢い"センサ
 - 判断機能が備わっている
 - データの補正・補間が可能
 - 統計的情報処理が可能
 - 取り込みデータの解析が可能
 - 複数のセンサ間の情報交換が可能
 - 環境変化に適合
 - アルゴリズムも必要に応じ変更可能



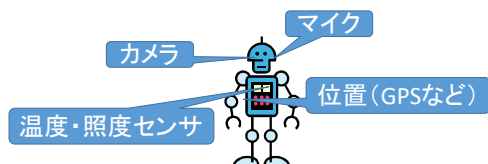
例: ムーヴバンド2(ドコモヘルスケア製)
歩数、移動距離、消費カロリー、睡眠時間)が計測され、スマートフォンとの連携によりクラウド上にデータが蓄積

22

センサフュージョン(融合):

異種センサから得られる情報を融合して総合的に情報・状況を捉えようとするもの。

例: ロボット



自律的ロボットなどではこの状況をもとにさらに動作(アクチュエーション)をさせるものもある

23

センサの種類:

主に以下のような種類がある。

- 力学量を検出
- 光を検出
- 電気・磁気量を検出
- 超音波を検出
- 温度を検出
- ガスを検出
- 成分量を検出
- X線や放射線量を検出
- など

非接触センサ:

直接対象物に触れずに測定

- 光を検出
- 電気・磁気量を検出
- 超音波を検出
- など

24

非接触センサの検出例1: 光検出

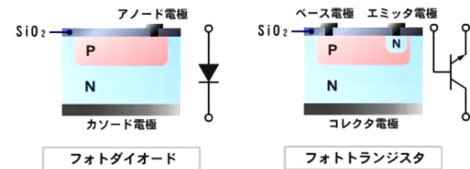
素子構造	素子名	材料
PN接合	Pnフォトダイオード	Si, Ge, GaAs
	Pinフォトダイオード	Si
	アバランシェフォトダイオード	Si, Ge
	フォトトランジスタ	Si
	フォトIC, フォトサイリスタ	Si
PN接合なし	光導電素子	CdS, CdSe, Se, PbS
	焦電素子	PZT, LiTaO ₃ , PbTiO ₃
真空管	光電管、フォトマル、撮像管、UVTロン	

25

フォトダイオードとフォトトランジスタの説明:

フォトダイオード・フォトトランジスタ

- ・ 光エネルギーを電気エネルギーに変換する代表的な光センサとして使用されている
- ・ テレビやビデオの赤外線リモコンの受信用として用いられる



非接触センサの検出例2: 磁気を検出

- ・ 非常に広範囲のレンジで計測が可能: 10^{15}
 - ・ 脳活動 (地磁気の1億分の1)も計測が可能
- ホール効果(後述)、巨大磁気抵抗効果(GMR)

旭化成エレクトロニクス	大岡特殊鋼	日立金属
HS-0111	HQ-0111	HG-0111
GIGS SNO1	GMR センサー	
ホール効果	ナノ・グラニュー	TMR
InSb	InAs	GaAs
		NiFe系と軟磁性材料
		未公表

非接触センサの検出例3: 超音波を検出

物体検出に利用される。モーションセンサや非破壊検査に応用。

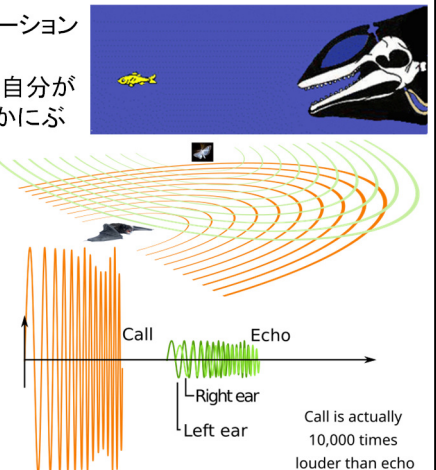


距離測定が可能な超音波測距センサ

27

(参考) エコーロケーション (echolocation)

コウモリやイルカは自分が発した超音波が何かにぶつかって返ってきた反響(こだま、やまびこ)によって物体の距離・方向・大きさなどを知ることが出来る。

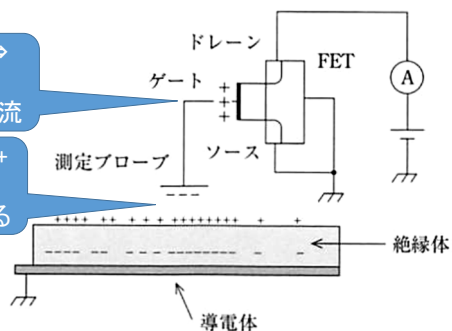


次回の予告: センサーによる物理量の計測(1)

高入力インピーダンスFETを使って、絶縁体の表面に発生する電位、あるいは電荷分布を非接触で測定する。(静電誘導)

プローブが- ⇒
ゲートが+ ⇒
ドレインから電流

絶縁体表面に+
がたまると
プローブが-になる



FETによる電荷分布測定(参考書図5.1より転載)

29