

### 前回の復習:

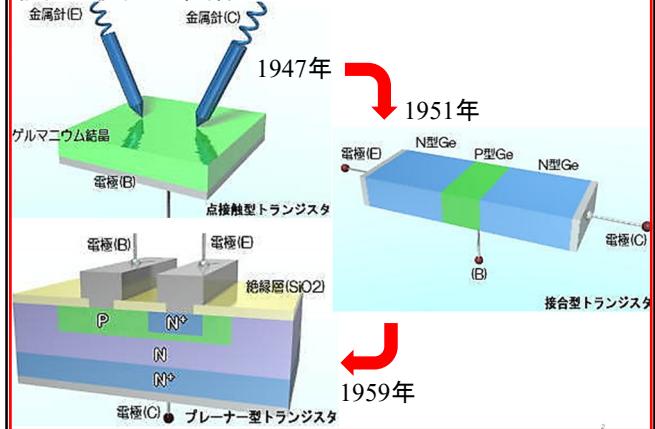
#### エレクトロニクスの発展:

1869年に電子(陰極線: Cathode ray)が発見され、その後、電気通信の検波・増幅や電子計算機のスイッチング素子用に、二極真空管、三極真空管、バイポーラ・トランジスタ、MOS-FET、集積回路等が次々と発明された。

#### 計算機の発達:

17世紀の手回し式機械計算機を経て、19世紀に解析機関(機械式コンピュータ)の設計が試みられたが未完成に終わった。その後、20世紀半ばに汎用電子計算機Zuse Z3、ENIACが開発された。さらに、トランジスタとMOS-FETが発明されて、全トランジスタ式電子計算機IBM 7090、インテル社のCPU(Intel 4004)等が開発され、電子計算機が高度に発達した。

### 前回の復習: 3種類のバイポーラ・トランジスタ:



### 前回の復習: 電子計算機の今後: 量子コンピュータ:

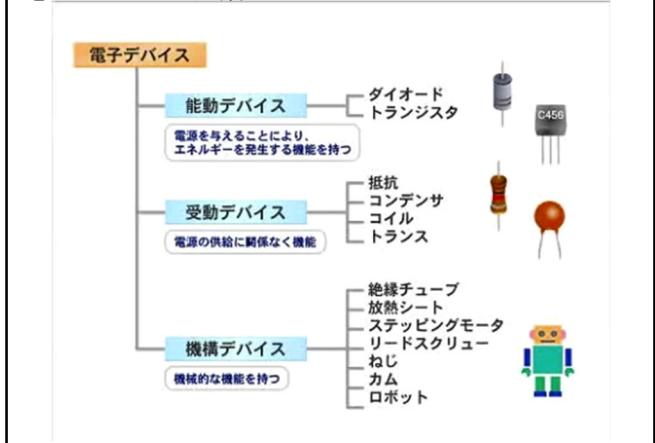
量子ビット(Qbit)で0と1の値を重ね合わせた状態のデータを保持できる。現在の最速スーパーコンピュータで数千年かかるても解けない様な計算を数秒で解ける。

2023年10月5日  
理化学研究所

国産量子コンピュータ初号機の愛称「叡(えい)」に決定  
-量子コンピュータ実機開発の第一歩であることを表現-



### 電子デバイスの分類:



### 受動デバイス:

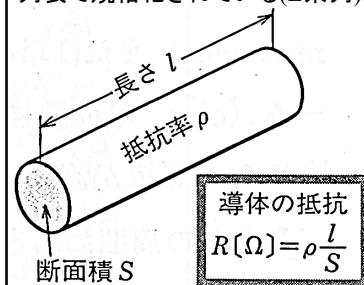
供給された電力を消費、蓄積、放出するだけの受動的なデバイス(受動素子)で、能動動作を行わない電気部品を受動素子という。具体的には、

- ・電気抵抗器 [Ω] (Resistance)
  - ・コンデンサ(キャパシタ) [F] (Capacitor)
  - ・コイル [H] (Inductor, coil)
  - ・変圧器(トランス) [変圧比]  
(Transformer, Voltage converter)
  - ・圧電(ピエゾ)素子(Piezoelectric element)  
水晶振動子 (Quartz crystal unit)
- 等を指す。

(補足) ダイオードやトランジスタ等は能動素子である。

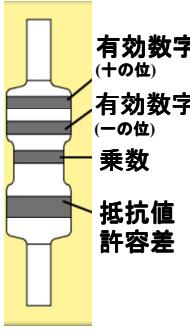
**電気抵抗器:** 抵抗値 $R$ は、物質固有の電気抵抗率 $\rho$ に長さ $l$ を掛けて断面積 $S$ で割ったものである。

一般に市販されている電気抵抗器の抵抗値は等比数列による数列表で規格化されている(E系列)。

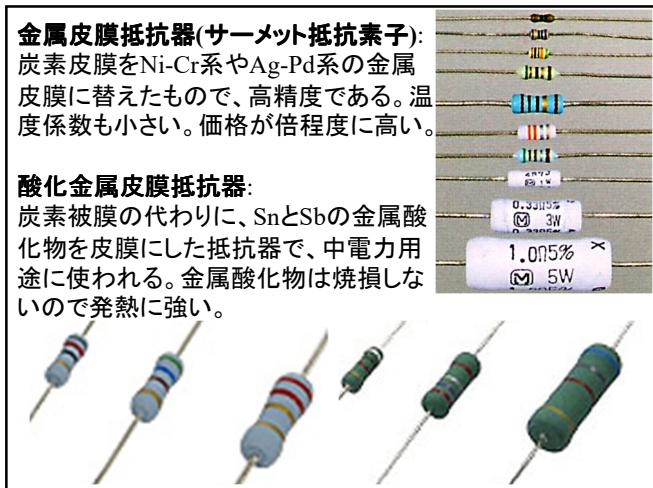
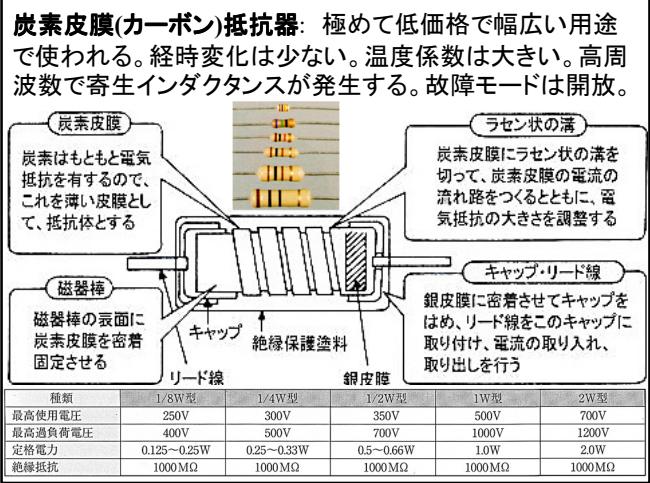


E3 許容差40%	E6 許容差20%	E12 許容差10%	E24 許容差5%
10	10	10	10
	12	12	11
	15	15	12
22	18	18	13
	22	22	15
	27	27	16
33	33	33	20
	36	36	22
	39	39	24
47	47	47	30
	51	51	33
	56	56	36
68	68	68	43
	75	75	47
	82	82	51
	91	91	56

**カラーコード:**



色	有効数字	乗数	抵抗値 許容差	覚え方
黒	0	$10^0=1$	—	黒い礼服
茶	1	$10^1=10$	$\pm 1\%$	一茶
赤	2	$10^2=100$	$\pm 2\%$	赤いニンジン
橙	3	$10^3=1,000$	—	みかん
黄	4	$10^4=10,000$	—	四季
緑	5	$10^5=100,000$	$\pm 0.5\%$	みどりご
青	6	$10^6=1,000,000$	$\pm 0.25\%$	青二才の ろくでなし
紫	7	—	$\pm 0.10\%$	紫式部
灰	8	—	—	ハイヤー
白	9	—	—	ホワイト クリスマス
金	—	$10^{-1}=0.1$	$\pm 5\%$	—
銀	—	$10^{-2}=0.01$	—	—



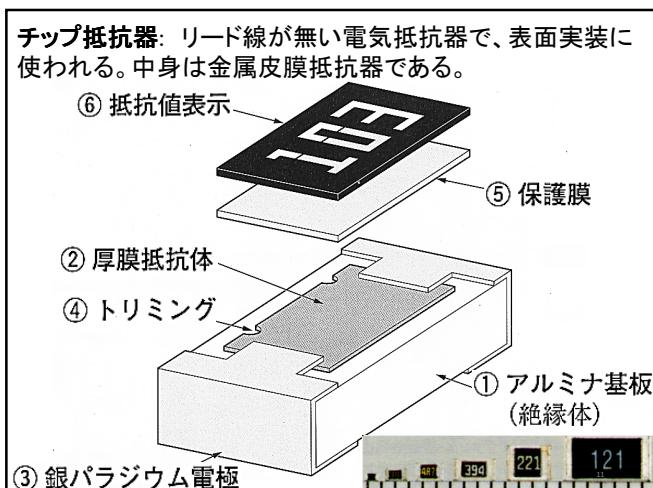
### 大電力・大電流用抵抗器:

**巻線抵抗器:** マンガニン線やニクロム線を碍子に巻いた抵抗器で、温度の影響が小さく雑音も比較的小さい。

**セメント抵抗器:** 酸化金属皮膜抵抗器や巻線抵抗器をセラミックのケースに入れセメント(シリコン樹脂)で固めた抵抗器である。

**ホーロー抵抗器:** 巷線抵抗器の外側にホーロー(ガラス質の材料)を焼き付けた抵抗器である。

**メタル・クラッド巻き線抵抗器:** 巷線抵抗を絶縁して金属ケースに入れた抵抗器である。

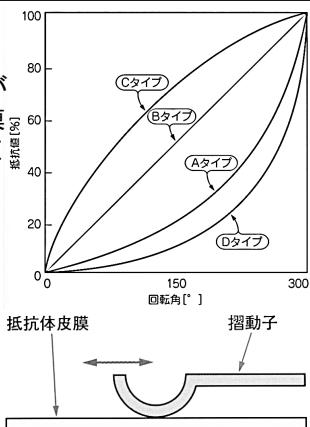
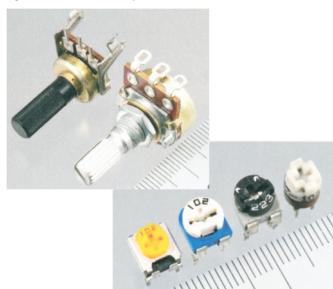


呼称	EIA型式	サイズ [mm]
0603	0201	
1005	0402	
1608	0603	
2012	0805	
3216	1206	
3225	1210	
5025	2010	
6432	2512	

**色碼表示例:** 103

第1桁	第2桁	第3桁
第1数字	第2数字	乗数
0	0	$10^0$
1	1	$10^1$
2	2	$10^2$
3	3	$10^3$
4	4	$10^4$
5	5	$10^5$
6	6	$10^6$
7	7	$10^7$
8	8	$10^8$
9	9	$10^9$

**可変抵抗器(バリオーム):** 抵抗値を調整できる抵抗器。ボリューム型と半固定型(トリマ)がある。抵抗体自体は、炭素皮膜や金属皮膜や巻線抵抗器が使われている。



ここで、(15.2)式の右辺に、ガウスの発散定理を適用すると、

$$Q = \varepsilon \iiint_{\text{上の電極内部}} \operatorname{div} \vec{E} \cdot d\vec{v} = \varepsilon \iint_{\text{上の電極の全表面}} \vec{E} \cdot d\vec{s},$$

となるが、理想的なコンデンサの電場 $E (=V/d)$ は電極間(誘電体部分)だけに一様に発生するので、

$$Q = \varepsilon \iint_{\text{上の電極の全表面}} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \varepsilon \iint_{\text{上の電極の下面}} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \varepsilon S E = \frac{\varepsilon S}{d} V, \quad (15.3)$$

となる。従って、コンデンサの静電容量 $C$ は、

$$C = Q/V = \varepsilon S/d, \quad (15.4)$$

となる。電極面積 $S$ と電極間の絶縁体の誘電率 $\varepsilon$ が大きい程、また電極間隔 $d$ が小さい程、静電容量 $C$ は大きい。

また、コンデンサでの電圧と電流の関係は、

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt}, \quad (15.5) \quad \text{となる。}$$

15

**コンデンサ(キャパシタ):** 電荷を蓄える受動素子。平行平板コンデンサの静電容量 $C$ を求めてみよう。今、間隔 $d$ だけ離れた面積 $S$ の2枚の金属板からなるコンデンサに電圧 $V$ を印加し、上下の金属板にそれぞれ電荷 $\pm Q$ が貯まっているとすると、上の電極内部で電荷密度 $\rho$ を体積積分すると電荷 $Q$ と等しくなければならない。

$$Q = \iiint_{\text{上の電極内部}} \rho \cdot d\vec{v}, \quad (15.1)$$

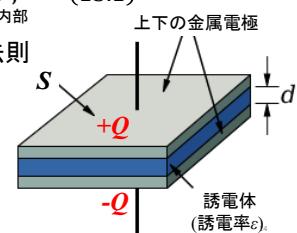
となる。(15.1)式とクーロンの法則

$$\varepsilon \cdot \operatorname{div} \vec{E} = \rho$$

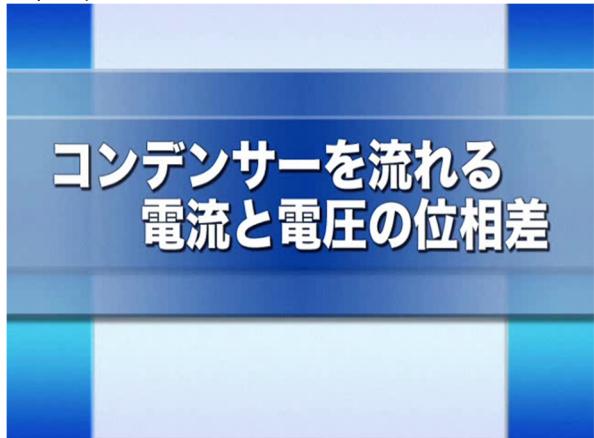
を組み合わせると、

$$Q = \iiint_{\text{上の電極内部}} \varepsilon \cdot \operatorname{div} \vec{E} \cdot d\vec{v}, \quad (15.2)$$

が得られる。



**コンデンサ:**



**コンデンサのインピーダンス:** コンデンサーに交流電圧 $V(t) = V_0 e^{j\omega t}$ を印加すると、(15.5)式から交流電流 $I(t)$ は、

$$I(t) = C \frac{dV(t)}{dt} = CV_0 \frac{de^{j\omega t}}{dt} = j\omega CV_0 e^{j\omega t} = j\omega CV(t),$$

となる。よって、コンデンサーのインピーダンス $Z$ は、

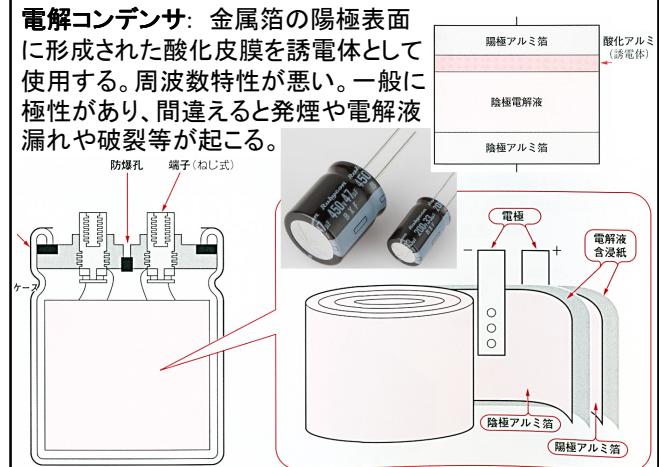
$$Z = \frac{V(t)}{I(t)} = \frac{1}{j\omega C}, \quad (15.6)$$

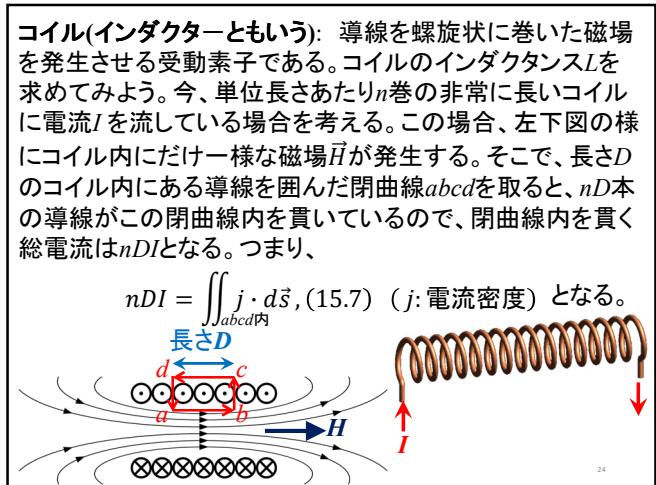
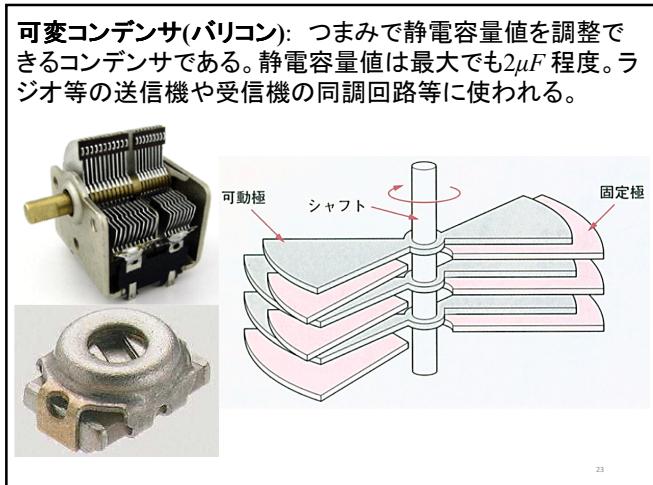
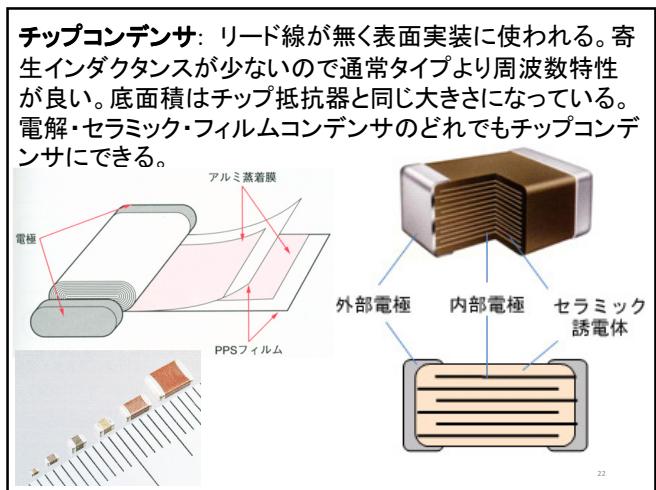
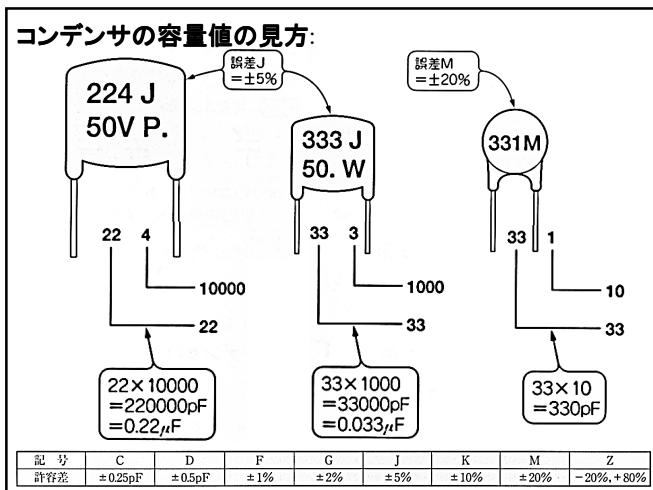
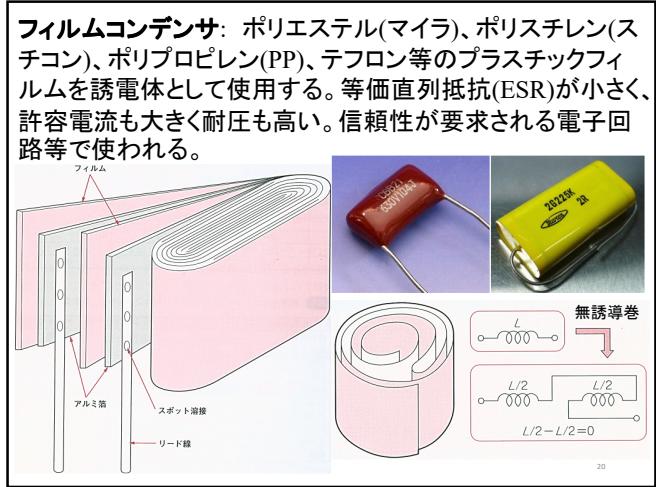
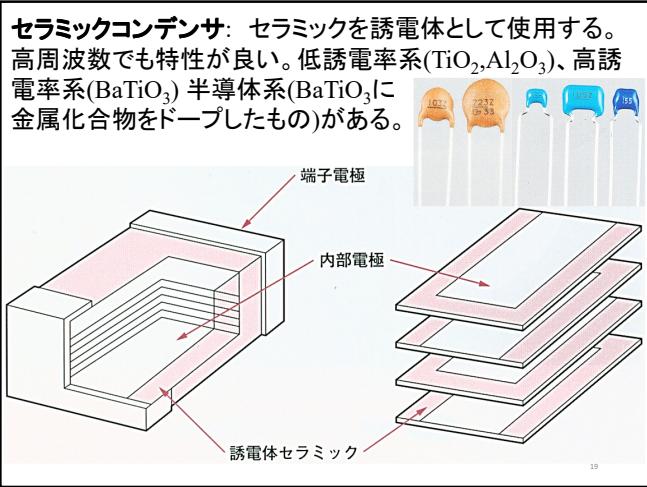
となる。

物質	空気	ポリエチレン	ポリエチステル	雲母	アルミニウム	水	パチリウム酸
比誘電率	1.0	2.2	2.0 2.6	5 7	8 10	80 100 2000	500 2000

16

**電解コンデンサ:** 金属箔の陽極表面に形成された酸化皮膜を誘電体として使用する。周波数特性が悪い。一般に極性があり、間違えると発煙や電解液漏れや破裂等が起こる。





一方、(定常状態で変位電流の無い)アンペールの法則  
 $\text{rot} \vec{H} = \vec{j}$ , と(15.7)式より、

$$nDI = \iint_{abcd\text{内}} j \cdot d\vec{s} = \iint_{abcd\text{内}} \text{rot} \vec{H} \cdot d\vec{s}, \quad (15.8)$$

が得られる。ここで、(15.8)式の右辺の閉曲線内の面積分にストークスの定理を適用すると、

$$\begin{aligned} nDI &= \iint_{abcd\text{内}} \text{rot} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \oint_{abcd} \vec{H} \cdot d\vec{l} \\ &= \int_{ab} \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_{bc} \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_{cd} \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_{da} \vec{H} \cdot d\vec{l} \end{aligned}$$

となる。このうち $cd$ 間はコイルの外側で磁場 $\vec{H} = 0$ なので、その積分も0となる。また $bc$ 間と $da$ 間は磁場 $\vec{H}$ と線要素 $d\vec{l}$ ベクトルが互いに垂直なので、その内積は0で積分も0となる。

25

従って、上式の右辺は第1項の $ab$ 間だけが残るので、

$$nDI = \int_{ab} \vec{H} \cdot d\vec{l} = DH, \quad nI = H, \quad (15.9)$$

が得られる。次に、電流とコイル内の磁場 $\vec{H}$ が時間変化する場合を考えてみよう。電磁誘導の法則

$$\text{rot} \vec{E} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt}, \quad \text{断面積 } S$$

をコイルの断面 $S$ で面積分すると、

$$\begin{aligned} \iint_{\text{コイルの断面}} \text{rot} \vec{E} \cdot d\vec{S} &= -\mu \iint_{\text{コイルの断面}} \frac{d\vec{H}}{dt} \cdot d\vec{S} = -\mu \frac{dH}{dt} S \\ &= -n\mu S \frac{dI}{dt}, \quad (15.10) \end{aligned}$$

となるが、(15.10)式の左辺にストークスの定理を適用すると、

26

$$-n\mu S \frac{dI}{dt} = \iint_{\text{コイルの断面}} \text{rot} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_{\text{コイル一周}} \vec{E} \cdot d\vec{l} \equiv -V_1,$$

$$V_1 = n\mu S \frac{dI}{dt}, \quad (15.11)$$

となり、コイル1巻きに発生する電圧 $V_1$ が得られる。従って、コイルの単位長さ当たりのインダクタンス $L$ は、

$$V = nV_1 = n^2 \mu S \frac{dI}{dt} \equiv L \frac{dI}{dt}, \quad (15.12)$$

$$L = n^2 \mu S, \quad (15.13)$$

となる。単位長さ当たりの巻数 $n$ 、コイルの断面積 $S$ 、コイル内の透磁率 $\mu$ が大きいほど、インダクタンス $L$ は大きい。

27

### コイルのインピーダンス:

コイルに交流電流 $I(t) = I_0 e^{j\omega t}$ を流すと、発生する交流電圧 $V(t)$ は、(15.12)式から、

$$V(t) = L \frac{dI(t)}{dt} = LI_0 \frac{de^{j\omega t}}{dt} = j\omega LI_0 e^{j\omega t} = j\omega L I(t),$$

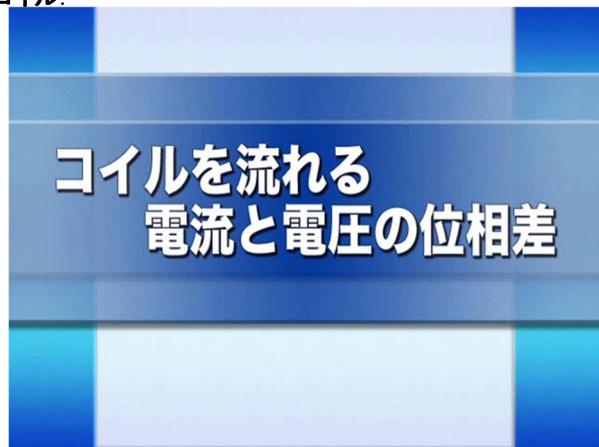
となる。よって、コイルのインピーダンス $Z$ は、

$$Z = \frac{V(t)}{I(t)} = j\omega L, \quad (15.14)$$

となる。

28

### コイル:



**空芯コイル:** コイルの芯がないか、非磁性体であるコイル。耐電力が大きく、インダクタンス $L$ が小さい。周囲の物体の影響や、巻線の間隔(ピッチ)の狂いによりインダクタンスが変動しやすい。



**コアコイル:** フェライト(酸化鉄系セラミックス)等の強磁性体を芯に持つコイル。内部のコアを上下に動かし、インダクタンスの値を調整できるもの(半固定型)もある。



30

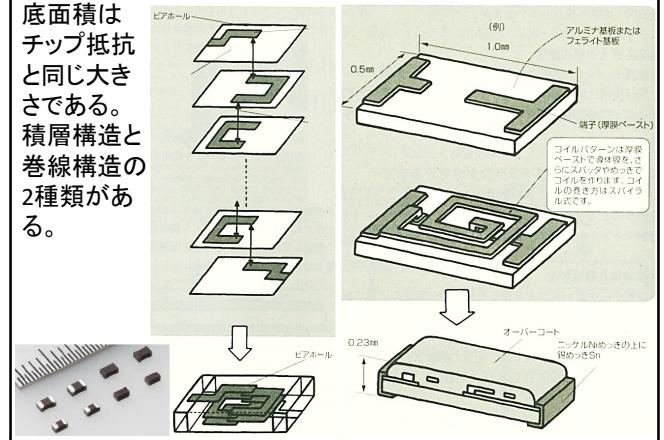
**トロイダルコイル:** ドーナツ型の強磁性体に導線を巻いたコイル。ノイズの影響を受けにくい、漏れ磁束が少ない、インダクタンスの安定性・再現性が高いなどの利点があり、高周波回路に多く用いられる。



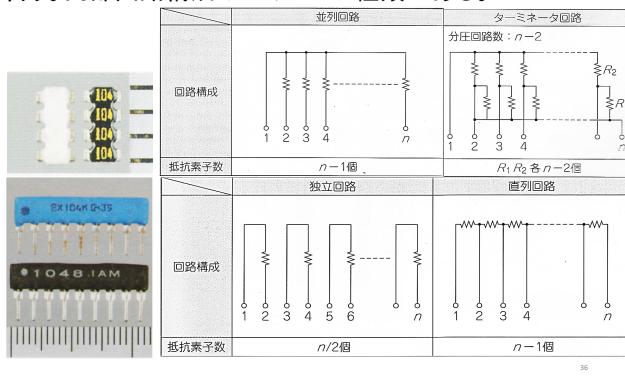
31

**チップインダクタ:** リード線が無く、表面実装に使われる。

底面積はチップ抵抗と同じ大きさである。積層構造と巻線構造の2種類がある。



**(付録) 集合抵抗器:** 複数の抵抗器を1つのパッケージに封入した抵抗器である。ネットワーク抵抗、抵抗アレイとも言う。内部回路構成はいくつかの種類がある。



**(付録) 変圧器(トランス):** 交流電圧を変換する電力機器・電子部品である。変圧、インピーダンス整合などで利用される。入力巻線(一次)の交流電流がコア内に変動磁場を発生させ、それが出力巻線(二次)に起電力を発生させる。入力電圧  $V_1$  と出力電圧  $V_2$  の比を変圧比いう。通常の変圧器では、変圧比は巻数比と等しい( $V_1 / V_2 = N_1 / N_2$ )。変圧比を変えられるオートトランジスタもある。

