

前回の復習:

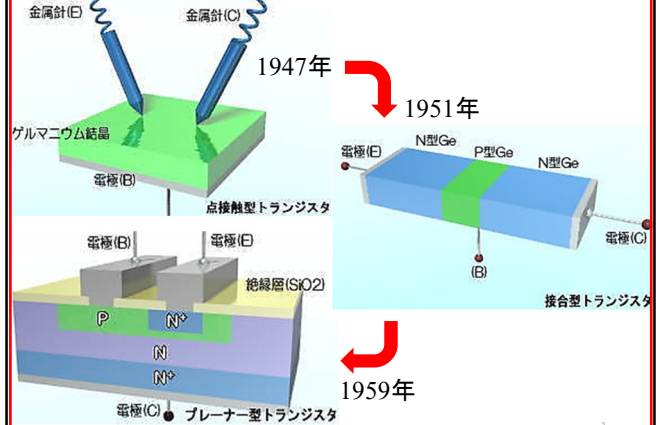
エレクトロニクスの発展:

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:

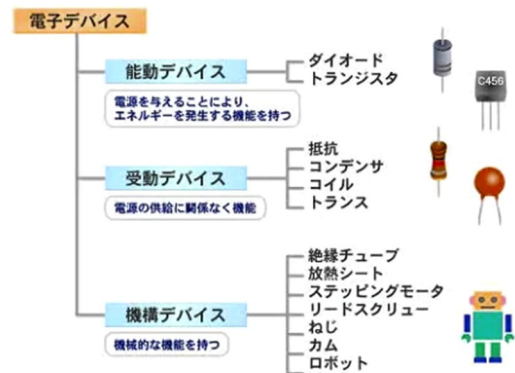
量子ビット(Qbit)で0と1の値を重ね合わせた状態のデータを保持できる。現在の最速スーパーコンピュータで数千年かかっても解けないような計算を数秒で解ける。

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:

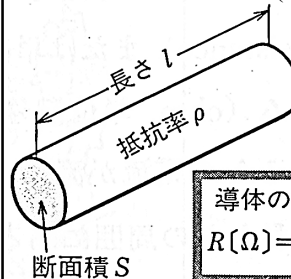
供給された電力を消費、蓄積、放出するだけの受動的なデバイス(受動素子)で、能動動作を行わない電気部品を受動素子という。具体的には、

- ・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(Piezo 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。

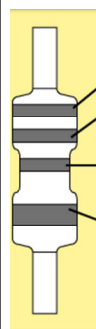
電気抵抗器: 抵抗値 R は、物質固有の電気抵抗率 ρ に長さ l を掛けて断面積 S で割ったものである。

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
		11	11
		12	12
		13	13
22	15	15	15
		16	16
		18	18
		20	20
47	22	22	22
		24	24
		27	27
		30	30
100	33	33	33
		36	36
		39	39
		43	43
200	47	47	47
		51	51
		56	56
		62	62
500	68	68	68
		75	75
		82	82
		91	91

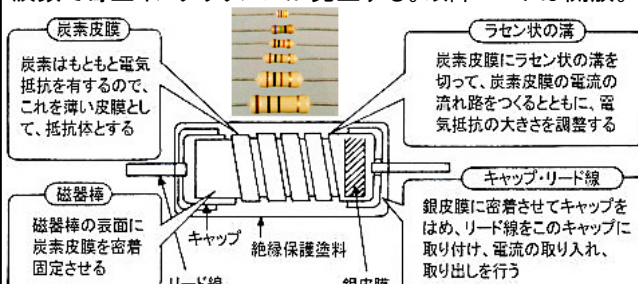
カラーコード:



有効数字
(十の位)
有効数字
(一の位)
乗数
抵抗値
許容差

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

炭素皮膜(カーボン)抵抗器: 極めて低価格で幅広い用途で使われる。経時変化は少ない。温度係数は大きい。高周波数で寄生インダクタンスが発生する。故障モードは開放。



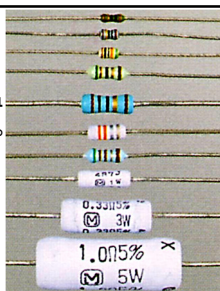
種類	1/8W型	1/4W型	1/2W型	1W型	2W型
最高使用電圧	250V	300V	350V	500V	700V
最高過負荷電圧	400V	500V	700V	1000V	1200V
定格電力	0.125~0.25W	0.25~0.33W	0.5~0.66W	1.0W	2.0W
絶縁抵抗	1000MΩ	1000MΩ	1000MΩ	1000MΩ	1000MΩ

金属皮膜抵抗器(サーメット抵抗素子):

炭素皮膜をNi-Cr系やAg-Pd系の金属皮膜に替えたもので、高精度である。温度係数も小さい。価格が倍程度に高い。

酸化金属皮膜抵抗器:

炭素被膜の代わりに、SnとSbの金属酸化物を皮膜にした抵抗器で、中電力用途に使われる。金属酸化物は焼損しないので発熱に強い。



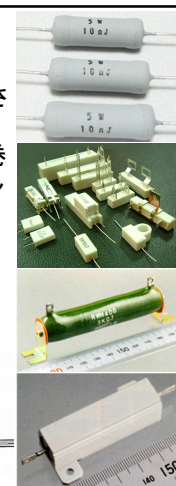
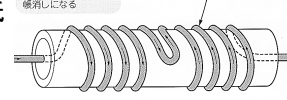
大電力・大電流用抵抗器:

巻線抵抗器: マンガニン線やニクロム線を導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: 巻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: 巻線抵抗を絶縁して金属ケースに入れた抵抗器である。



チップ抵抗器: リード線が無い電気抵抗器で、表面実装に使われる。中身は金属皮膜抵抗器である。

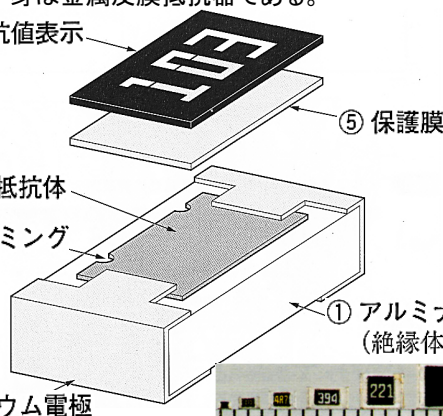
⑥ 抵抗値表示

② 厚膜抵抗体

④ トリミング

① アルミナ基板(絶縁体)

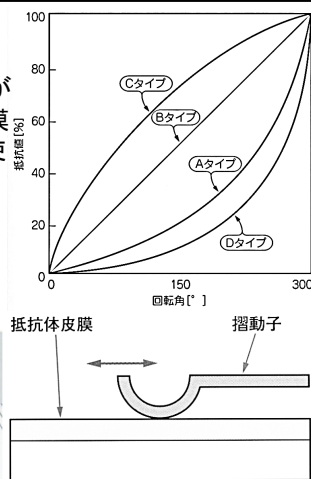
③ 銀パラジウム電極



呼称	EIA型式	サイズ [mm]
0603	0201	0.6 0.3
1005	0402	1.0 0.5
1608	0603	1.55 0.8
2012	0805	2.0 1.25
3216	1206	3.1 1.55
3225	1210	3.2 2.6
5025	2010	5.0 2.5
6432	2512	6.3 3.15

103		
第1桁 第1数字	第2桁 第2数字	第3桁 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。



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 ρ を体積分すると電荷 Q と等しくなければならないので、

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

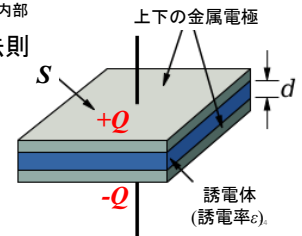
となる。(15.1)式とクーロンの法則

$$\epsilon \cdot \text{div} \vec{E} = \rho$$

を組み合わせると、

$$Q = \iiint_{\text{上の電極内部}} \epsilon \cdot \text{div} \vec{E} \cdot dv, \quad (15.2)$$

が得られる。



ここで、(15.2)式の右辺に、ガウスの発散定理を適用すると、

$$Q = \epsilon \iiint_{\text{上の電極内部}} \text{div} \vec{E} \cdot dv = \epsilon \oiint_{\text{上の電極の全表面}} \vec{E} \cdot d\vec{s},$$

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、

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

となる。従って、コンデンサの静電容量 C は、

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

となる。電極面積 S と電極間の絶縁体の誘電率 ϵ 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、

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

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

$$I(t) = C \frac{dV(t)}{dt} = C V_0 \frac{d e^{j\omega t}}{dt} = j\omega C V_0 e^{j\omega t} = j\omega C V(t),$$

となる。よって、コンデンサのインピーダンス Z は、

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

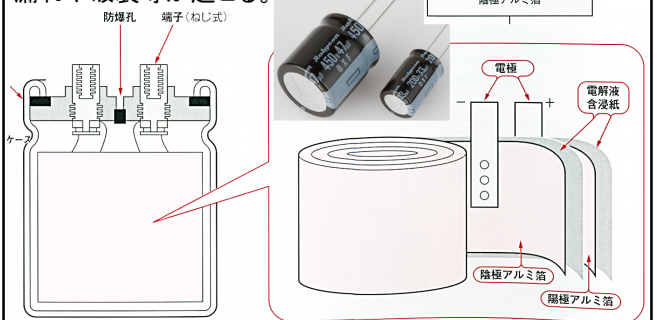
となる。

物質	空気	ポリエチレン	ポリエスデル	雲母	アルミ磁器	水	バチウム酸
比誘電率	1.0	2.2	2.0 2.6	5 7	8 10	80	500 2000

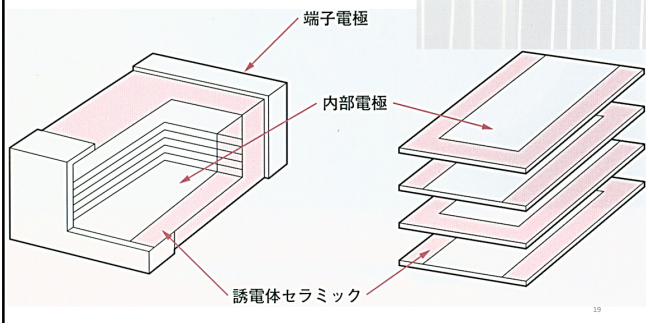
コンデンサ:

コンデンサを流れる
電流と電圧の位相差

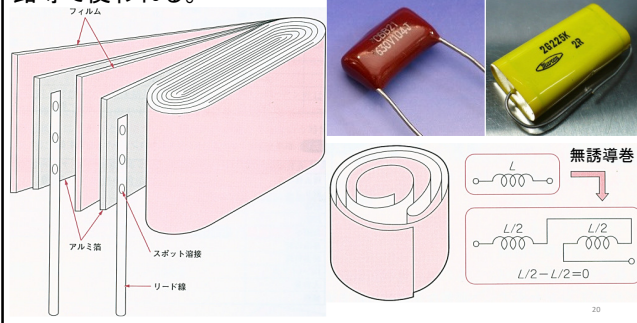
電解コンデンサ: 金属箔の陽極表面に形成された酸化皮膜を誘電体として使用する。周波数特性が悪い。一般に極性があり、間違えると発煙や電解液漏れや破裂等が起こる。



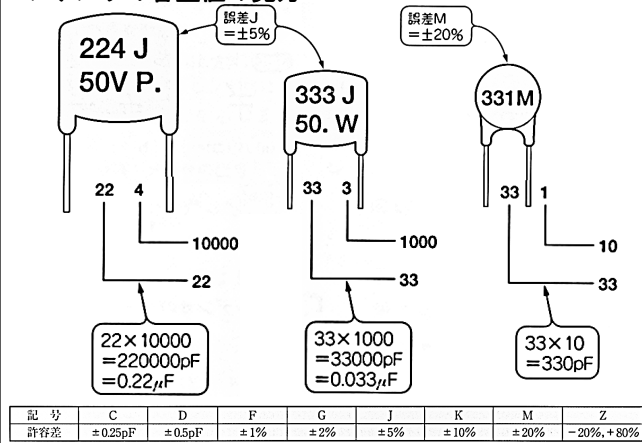
セラミックコンデンサ: セラミックを誘電体として使用する。高周波数でも特性が良い。低誘電率系($\text{TiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$)、高誘電率系(BaTiO_3) 半導体系(BaTiO_3 に金属化合物をドーブしたもの)がある。



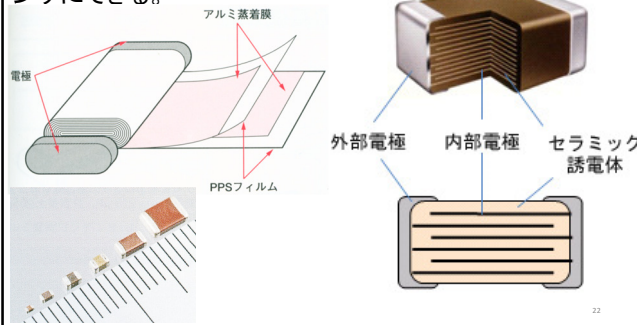
フィルムコンデンサ: ポリエステル(マイラ)、ポリスチレン(スチコン)、ポリプロピレン(PP)、テフロン等のプラスチックフィルムを誘電体として使用する。等価直列抵抗(ESR)が小さく、許容電流も大きく耐圧も高い。信頼性が要求される電子回路等で使われる。



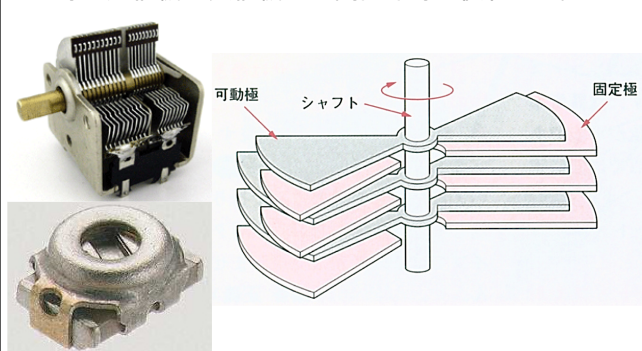
コンデンサの容量値の見方:



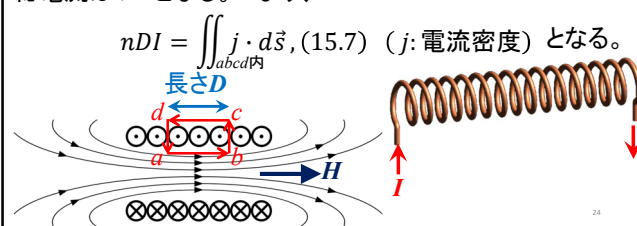
チップコンデンサ: リード線が無く表面実装に使われる。寄生インダクタンスが少ないので通常タイプより周波数特性が良い。底面積はチップ抵抗器と同じ大きさになっている。電解・セラミック・フィルムコンデンサのどれでもチップコンデンサにできる。



可変コンデンサ(バリコン): つまみで静電容量値を調整できるコンデンサである。静電容量値は最大でも $2\mu\text{F}$ 程度。ラジオ等の送信機や受信機の同調回路等に使われる。



コイル(インダクターともいう): 導線を螺旋状に巻いた磁場を発生させる受動素子である。コイルのインダクタンス L を求めてみよう。今、単位長さあたり n 巻の非常に長いコイルに電流 I を流している場合を考える。この場合、左下図のようにコイル内にだけ一様な磁場 \vec{H} が発生する。そこで、長さ D のコイル内にある導線を囲んだ閉曲線 $abcd$ を取ると、 nD 本の導線がこの閉曲線内を貫いているので、閉曲線内を貫く総電流は nDI となる。つまり、



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、

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

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

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

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 μ 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、

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

となる。よって、コイルのインピーダンス Z は、

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

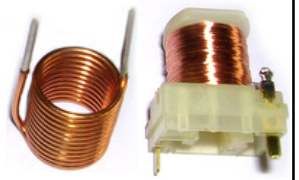
となる。

28

コイル:

コイルを流れる
電流と電圧の位相差

空芯コイル: コイルの芯が無い
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

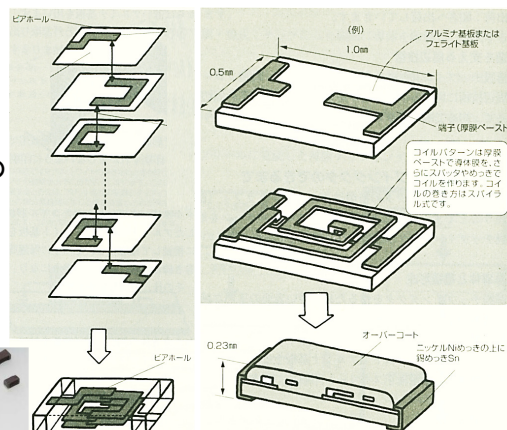
トロイダルコイル: ドーナツ型の強磁性体に導線を巻いたコイル。ノイズの影響を受けにくい、漏れ磁束が少ない、インダクタンスの安定性・再現性が高いなどの利点があり、高周波回路に多く用いられる。



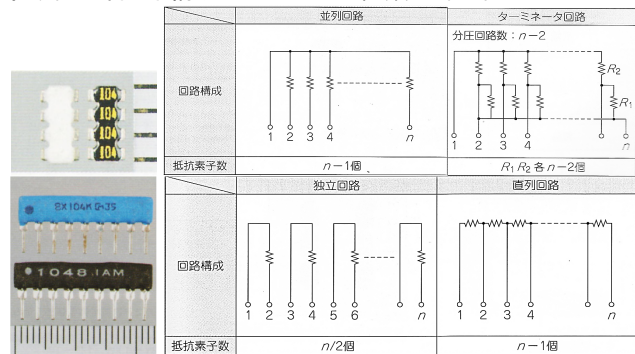
31

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。



35

(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 の比を変圧比という。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スもある。

