電子回路論 第 1 回

勝本信吾
東京大学理学部・理学系研究科 (物性研究所)

2014 年 10 月 5 日

第 1 章 電子回路序論

1.1 「電子回路論」という講義

2014 年度後期,「電子回路論」を担当することになった.「電子回路論」というのを物理学専攻後期課程で開講する，というのは全国でも珍しい方ではないか（調べたわけではない)？何故このような講義が開かれるのか？一説によれば，電磁気学の教科書その他で有名な高橋秀俊先生の「物理学汎論」に源流を持つものである[*1].

「物理学汎論」というのがいかなる講義であったか，ということは，幸い文献 [1] が文庫の形で復刊され，読むことができる．これは，余り「電子回路論」らしくない．書名の通り，一見異なる様々な物理現象の中に底流として流れるメタな物理学原理のようなものを色々と探っている講義のようである．しかし，考えてみると，電子回路という物理系は，このようなメタな原理を見るには格好の舞台ではないか？

1. 電子回路は電磁場を金属・絶縁体・半導体とう物質群を用いて人間による一種の「箱庭」としたものと考えることができる.
2. この「箱庭」は電磁気学の題材だけではなく，様々な力学現象のハードウェアシミュレータとして動かすことができる.
3. 更に，実体電子回路と数理モデルとの間に「回路図」という不思議な抽象物を挿入することを自然に行うことができる．回路図の抽象度には様々なレベルがあり，一般に抽象度が上がるほど簡単になる.
4. 数理モデルをあらわに書き下さなくても回路図から計算機が自動的にモデルを組み立て，数値シミュレーションを行うこともできる.

というように，電子回路にはこのような目的のために格好の条件が揃っており，天体や身の回りの運動系のような古典力学系，原子，分子，素粒子のような「実体」を考えやすい量子力学系以外にも数理の土俵にさえ乗せることができれば何でも物理学の対象になる，ということ自身を感じてもらうためにも良い題材であると思われる.

以上の考えに基づき，また，最近のこの講義のシラバスや講義ノートから線形システム論を中心にしつつ，実際物理実験家の役に立つ知識を伝授しつつ，可能であれば電子回路量子力学まで進みたいと考えている.

1.2 電子回路とは

1950 年くらいから電子回路は身の回りに氾濫するようになったから,「電子回路」と言われてイメージがわかない，という人は少ないと思うが，一応どんなものなのかざっと定義しておこう．電子回路とは，様々な物質を組み合わせ，様々な物理的**入力**に対し物理的な (多くの場合決定論的) **出力**が得られるよう工夫された装置のことである．し

[*1] 何しろもう真相をうかがえる先生がほとんどいらっしゃらず，確かな話は藪の中です．高橋先生が電子回路論の講義をされていた，ということ自身は複数の先生からうかがいましたので確かだと思います．今度近角先生にでもお会いしたら，ぜひうかがいたいとは思っています.

かし，これでは一般の物理装置そのものであるので，これに，その動作は**電子**の運動を主に利用するものである，という制限を加えよう．従って電子回路の中では原子 (原子核) の動きはないか，あっても補助的なものである．

しかし，このように定義すると，すぐに困ったことになることに気付くであろう．というのも，電子回路の多くは機械的な動きや各種波動などこの定義からはみ出してしまうものを含んでいるからである．この問題は，要するに「電子回路」というものをがっちり定義しようというのが，うまいアプローチではないことを示している．むしろ，一定の応答をする「システム」を考えるほうが定義に無理がなく，応用範囲も広い．これは一応電子回路論の講義なので，電子回路とは大体何なのかということを引き続き考えよう．

電子回路は，**回路部品**の組み合わせである．回路部品は電子回路論の立場からはブラックボックスで，金属の**端子**が出たものであり，多くの場合端子を金属の**導線**で結合 (接続) することで電子回路が構成される．導線による直接的な結合に対し，電磁誘導を用いる結合や，振動などを用いる結合 (この場合，「原子の動き」を使っていることになるが) もある．もちろん，どこまでが 1 つの部品か，というのは人間の思弁上の都合によるもので，いくらでも線引きを変えることができる．しかし，続くいくつかの節では，とりあえず秋葉原の部品店 (これも最近激減した．何十年と続く傾向の一部ではあるが) に出かけてパーツ皿に放り込んで買うようなポピュラーな部品について見ていくことにする．

1.3　2 端子素子

いきなり抽象論を繰り広げてもつまらないことこの上ない (少なくとも実験屋である講師 (勝本) は実は抽象論は好きでも得意でもない) ので，まずは具体的な回路部品の紹介から始めよう．回路部品は大抵 2 つ以上の端子を持っている．1 つしか端子のないものとしては，アンテナ，アース (接地) など，また，灯台端子，テフロンポストなどと呼ばれるものもある．この最後のグループは物理的に配線を支えることがその役割であり，現実の回路製作には大切であるが，モノターミナル素子，とは言えない．アンテナ，アースは全体として 1 つの部品，と思えば，2 端子素子と考えることができる．というわけで，まずは，2 端子を持つ回路部品について見ていくことにする．

1.3.1　電流電圧特性

2 端子素子を箱から端子が出ているシンボルで表すとする (図 1.1(a))．2 端子素子を特徴づけるわかりやすい特性が**電流電圧特性**である．電流の変数名を I，電圧の変数名を V とすることが多いことから，I-V 特性と略されることが多い．端子 1，2 の間の電圧が V_{12} の時，1→2 間に流れる電流を I_{12} が V_{12} の関数として

$$I_{12} = f(V_{12}) \tag{1.1}$$

のように書けるとき，関数 f をこの素子の電流電圧特性と呼ぶ．

2 端子素子には I-V 特性が定義できるものとできないものが存在する．**過渡応答**のことを考えると，現実の素子で厳密に I-V 特性が定義できる素子は存在しない．が，時間スケールを応答時間よりも十分長くとれば，(1.1) が良い

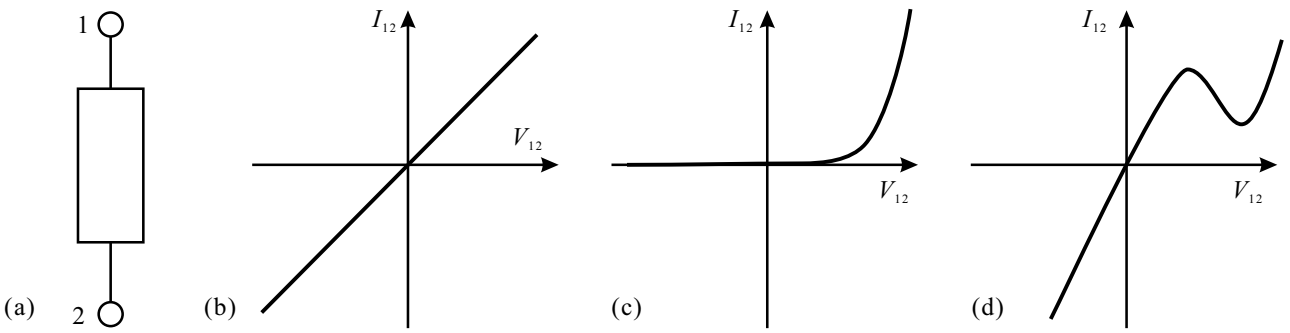


図 1.1　(a) 2 端子素子のシンボル図．(b) 抵抗器の電流電圧特性．(c) ダイオードの電流電圧特性．(d) トンネルダイオード (江崎ダイオード) の電流電圧特性．(いずれも模式図)

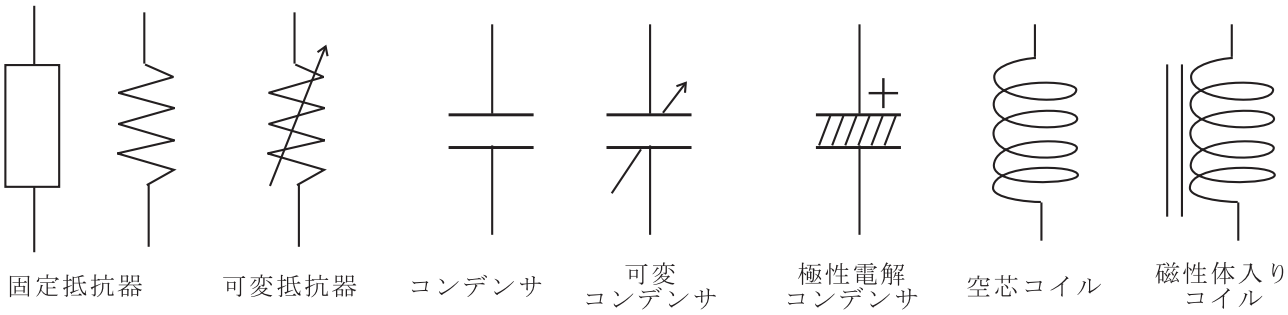


図 1.2　2 端子素子の回路記号例

近似となるし，過渡応答に関しても，(1.1) の I-V 特性を持つ素子と，それ以外の素子との組み合わせと考えることで近似することができることが多い．図 1.1(b)，(c)，(d) にそれぞれ抵抗器，ダイオード，トンネルダイオードの I-V 特性の模式図を描いている．抵抗器やダイオードの特性のように f の逆関数 g が定義できる場合は

$$V_{12} = g(I_{12}) \tag{1.2}$$

と書いて，これも I-V 特性と呼ぶ．また，図 1.1(d) のトンネルダイオードのように単調でないため g は単純には定義できないが，多価関数として定義することにする．

1.3.2　受動素子

(1.2) を拡張して，演算子 $\hat{A}$ について

$$V_{12} = \hat{A} I_{12} \tag{1.3}$$

と書く．小中学校の理科以来よく知られた 3 種類の回路素子について，

$$V_{12} = R I_{12} \qquad \text{(抵抗器)}, \tag{1.4a}$$

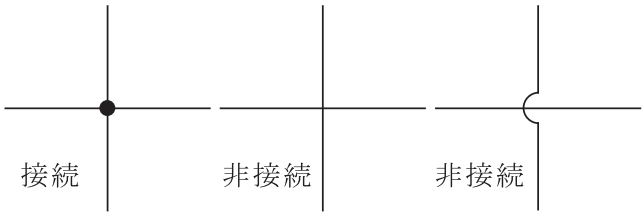
$$V_{12} = \frac{q(t)}{C} = \frac{1}{C}\int^{t} I_{12}(t')dt' \qquad \text{(キャパシタ)}, \tag{1.4b}$$

$$V_{12} = L\frac{dI_{12}}{dt} \qquad \text{(インダクタ)} \tag{1.4c}$$

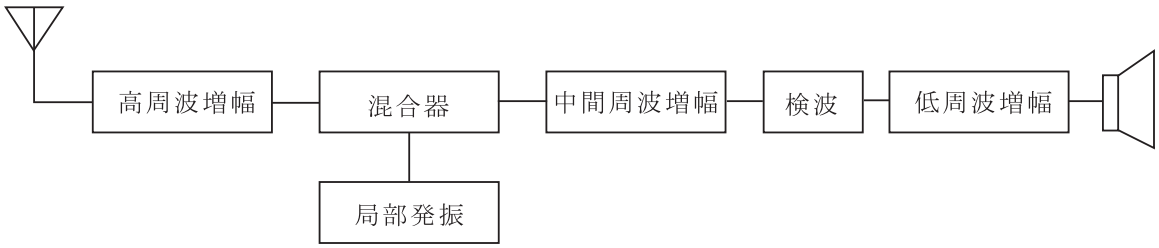
と定式化することができる．これらは，線形システムの基本であるインピーダンスを構成するための基本的な (受動) 回路素子 (passive element) である．R，C，L は定数で，それぞれ**抵抗** (resistance)，**キャパシタンス** (容量) (capacitance)，**インダクタンス** (inductance) と呼ぶ．

1.4　回路図

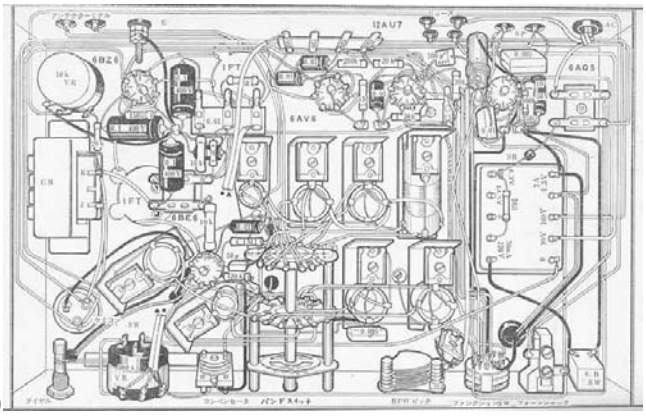
1.4.1　基本的な回路図



回路素子のもっとも簡単な結合法は，すでに述べたように金属導線で端子を直接結合するものである．導線を線で表し，結合の様子をトポロジカルに 2 次元の図面上に表したものを**回路図**と呼ぶ．各素子にはそれぞれ特徴的なアイコン (回路記号) を割り振って素子の素性がわかるようにする．回路記号には様々な流儀があるが，規格によって統一化が図られており，図 1.2 に示したジグザグ型の固定抵抗器記号はよく使用されて馴染みもあるものであろうが，国際規格では長方形を使用することになっている．導線同士の結合は右図のように黒い小さな丸で表す．黒丸がない導線のクロスは，結合がなく



(a)



(b)

図 1.3　(a) ブロックダイアグラムの例 (スーパーヘテロダイン受信機).　(b) 実体配線図の例 (三田無線 DX-CS-7 スーパーヘテロダイン受信機). CQ ham radio (CQ 出版社) 1966 年 5 月号 p.106「調整に主体をおいた デリカ DX-CS7 の作り方 / 三田無線研究所長 茨木悟」.

単に図面上の都合により線が交差しているだけである．この点を誤解しないよう，右図のように丸く線をまたぐように描いていた時期もあるが，現在ではこのような流儀は殆ど見られない．

1.4.2　様々な「回路図」

回路図には非常に多くの種類，階層がある．図 1.3 はかつてのアナログ通信時代に全盛を誇ったスーパーヘテロダイン型受信機の，(a) **ブロックダイアグラム**，(b) 実体配線図 と呼ばれる回路図形式である．昔懐かしい，電源トランスを搭載し，真空管を用いた回路であるが，「回路図とはどのようなものか」を感じるための例に過ぎないので，当然内容を理解する必要はない．同じ回路を表していながら，全く異なる図面になっていることがわかる．

ブロックダイアグラムでは，回路は機能ごとに極めて簡単化され，信号の流れを線で表している．消費エネルギーを供給するための電源とその供給ラインなどは省略されている (もちろん，明記する場合もある)．複雑な回路全体の動作を理解するためには便利，というより必要不可欠である．このように大幅な簡単化・抽象化を行っても大きな回路になると複雑を極めたものになる．また，上に述べた「基本的な回路図」の読み方に慣れた技術者は，頭の中で半ば無意識にブロックダイアグラムへの写像を行っていることが多い．ちなみに，図 1.3 の受信機を，1.4.1 の部品 + 配線による回路図で表すと，図 1.4 のようになる．

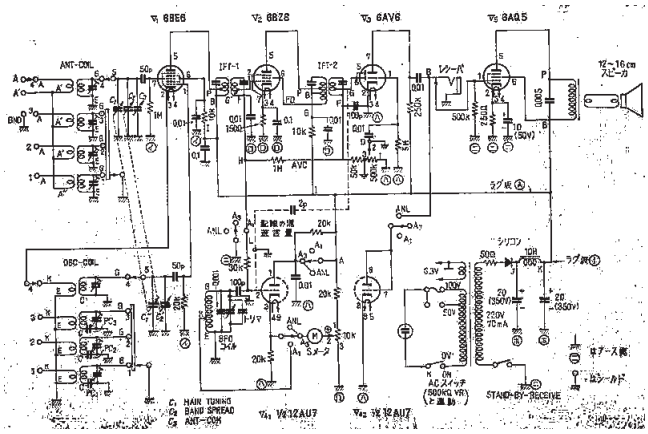


図 1.4　図 1.3 の受信機の回路記号を使用した基本的回路図.

(b) の実体配線図は，近年ほとんど見かけなくなった．回路図というよりは，部品配置や配線を見やすく描いた絵であり，ホビーとして真空管回路を組み立てる人にはたいへん助けになった．というのも，このようなプリント基板を使わない回路では，抵抗器やコンデンサなどの小物部品は配線しながら配置していったからである．いずれにしても，回路図というものが現実の回路のモデリング，抽象化であることが実感できると思う．講師の感覚では，現実世界の現象を幾つかの簡単な自由度 (あるいはその集団) に落としこんでそれらを結ぶ数学で記述する物理学のモデリングや，地球表面を地図という 2 次元図形に落としこむ作業，

トポロジカルな結合だけに着目する路線図への抽象化，資本の流れなど抽象的な事象を逆に図面上に可視化する作業など，様々なモデリング，抽象 ↔ 具象の変換作業のひな形が回路図にはあると思っている．

1.5　抵抗器

物理実験を行う上で大切な電子回路の知識 (アキバ的，あるいはニッポンバシ的知識) を伝授することもこの講義の大切な目的であるので，ここで，代表的な 3 つの受動素子のやや具体的な点を見ておこう．ただし，受動 3 素子の数理物理的側面はまだ十分解説していないので，ここでは，ごく表面的な解説に止め，もう少し深い部分については後で再度議論する．

(1.4a) の**オームの法則**は，近似則ではあるが，フェルミ準位付近の状態密度をほぼ一定として良い合金類その他の物質においては広い電圧電流範囲において非常に良く成立する．固定抵抗器とはこれらの材料を適当な形状として配線しやすい金属電極 (端子) を 2 つつけたものである．

一般の電流電圧特性 (1.2) でも，電圧が「飛び」を示すなどの特別な点を除いて一定の狭い電流 (電圧) 範囲であれば，**微分抵抗**

$$R_{\mathrm{d}} \equiv dg/dI_{12} \tag{1.5}$$

を考え，$\delta V_{12} = R_{\mathrm{d}}\delta I_{12}$ と (1.4a) の類似型に書くことができる．電子回路で「抵抗器」と呼ぶ場合は，一般にあらゆる電流電圧範囲で (1.4a) が成立するもの，とされ (逆に現実にはそのような理想的抵抗器は存在しないが) ているが，小振幅の高周波回路などを考える際には (1.5) によって抵抗器に置き換えた等価回路とする場合もある．

1.5.1　各種抵抗器

抵抗器も無数に分類することができる．以下幾つかの分類を示しながら抵抗器を紹介する．

(a) 回路図的分類

(1.4a) の R が変化しない**固定抵抗器**と何らかの外部パラメーターによって変化する**可変抵抗器**とに分類される．固定抵抗器についてはこの後見ていくことにして，物理実験で良く使用する可変抵抗器を見ておこう．

代表的なものを図 1.5 に示している．(a) は小学校の理科などでもお馴染みの直線摺動接触を用いた可変抵抗器で，巻線形の裸線の抵抗の上を接点を滑らせるものや，細い単一の線の上をすべらせるものがある．巻線型の場合は，巻線のピッチにより調整できる分解能が決まる．

(b) は最も代表的な回転型の可変抵抗器で，このような形状の場合，機器表面につまみを出して人間が指で回転させることで抵抗が変化する．ドライバーで回転させることで抵抗値を変化させ，回路定数の調整に使う，トリマーと称するもの (半固定抵抗) もある．巻線形や，ディスク型のカーボン抵抗体を回転させるものなど様々である．バリオーム，ポテンショメーターなど様々な呼称がある．現在ではほとんど使われることはないが，かつては音響信号の最終段の増幅器のゲイン調整に使用され (古い機械にある「Volume」つまみ)，人間の耳の音量感覚に合わせて回転角と抵抗値とが非線形の関係にある A 型と呼ばれる可変抵抗器が存在する．これに対して，回転角と抵抗変化が比

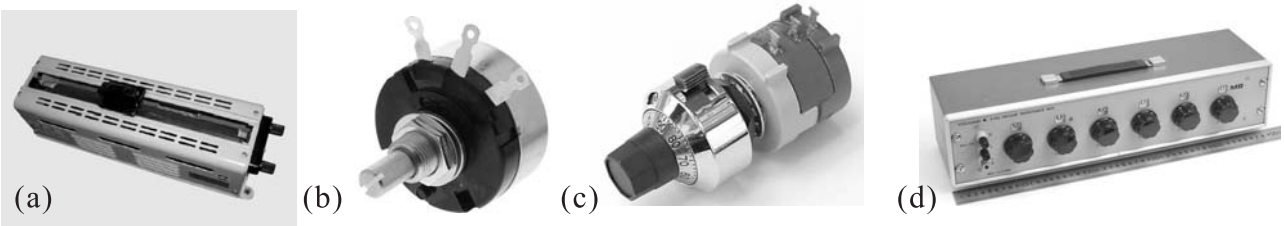


図 1.5　(a) 直線摺動型可変抵抗器 (b) 回転型可変抵抗器 (c) ヘリカルポテンショメーターおよびバーニアダイアル (d) 桁式 (ディケイド) 標準抵抗器

例関係にあるものはB型と呼ばれる．写真を見ると，端子が2つではなく3つ出ていることに気づかれると思うが，これは，両端の端子に全体の抵抗が接続され，中央の端子に摺動接触片が接続されている．従って端子に1，2，3と番号を振ると，$R_{13} = R_{12} + R_{23}$ で R_{13} は固定で，回転角を $\Delta\theta$ と置くと，$\Delta R_{12} = -\Delta R_{23} \propto \Delta\theta$ である．

(b) の回転型は，通常 R_{12} を0から R_{13} まで変化させるのに，回転角は 2π 以下である．精密な抵抗制御を広範囲にわたって行いたい場合，この変化のために複数回 (多くは10回転) の回転を必要とする (c) のヘリカルポテンショメータ (「ヘリポット」と略される) を使用する．角度を精密に制御/測定するためのバーニアダイヤルを合わせて使用することが多い．

(d) のディケイド型標準抵抗器は，較正された固定抵抗器をロータリースイッチで切り替えて抵抗を変化させるもので，非常な高精度が得られるが，一般に体積が大きくなってしまうことと，特に高い桁を切り替える際にいわゆる「グリッチ」と呼ばれる大きなスパイクノイズが生じることなどの問題もある．

(b) 形状による分類

以降は固定抵抗器に限って分類を見ていこう．小信号 (小電力) 回路に使用する抵抗器について外形 (形状) で分類するとすれば，まず面実装用であるか，そうでないか，ということで分類される．**面実装用**とは，半田合金 (本来はSnとPbの合金であるが，環境への配慮から，PbをZnその他の金属で置換する鉛フリー半田が現在の主流である) を予め流したプリント基板 (溶融合金内を基板をくぐらせることで流す) の表面に部品を配置し，オーブン内で瞬間的に熱して半田合金を溶かして**リフロー**状態にして完全自動配線するための部品形状のことを指す．このため，抵抗器では端子の「足」が出ておらず，図1.6(a) のように，小さな四角い板状の抵抗体の両側に細い帯状の金属電極を出した形をしている．**チップ型**抵抗とも呼ばれる．また，講師は見たことがないが，表面実装用の円筒形の抵抗器もある，とのことである．

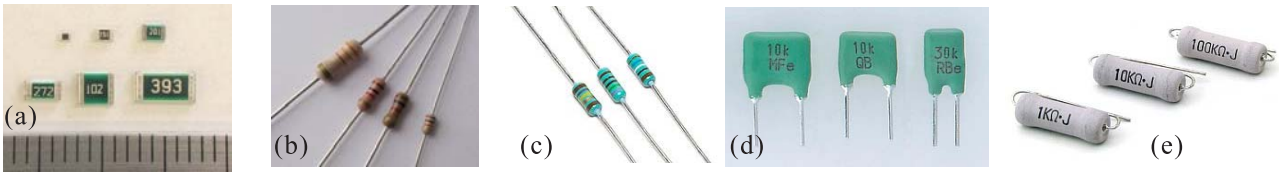


図1.6　様々な小電力固定抵抗器．(a) 表面実装用．(b) 炭素被膜抵抗．1/2W型から1/8W型まで．円筒型で抵抗値はカラーコード表示 (後述) されている．(c) 金属皮膜抵抗．円筒型，カラーコード表示．1/4W型．(d) 角型金属皮膜抵抗．(e) 1/2W型円筒形参加金属皮膜抵抗．

表面実装用でない抵抗器の特徴は，図1.6(b)-(e) のように，配線用の端子線が両側に出ていることである．(b)，(c)，(e) が円筒形，(d) が角形である．円筒形の抵抗の多くは，円筒形にした皮膜抵抗体にスパイラルを切る形で抵抗値を上げているため，(1.4a) の R 成分以外に (1.4c) の L 成分も持っていることが多く，高周波回路では，薄膜に往復ラインを切ることで抵抗にしている角形の抵抗器の方が有利になることがある．

(c) 材質による分類

抵抗体の材質は，合金を薄い膜にした**金属皮膜抵抗** (メタル抵抗) が温度特性，経年安定性に優れ，良く使用される．上に述べたように，円筒形でスパイラルが切られているとインダクタンス成分が問題となるが，合金線を巻いて抵抗体とする**巻線抵抗**に比べるとむしろインダクタンスは少ない．一方，薄膜がそれ程電流を流せないのに対して線材は大きな電流を流せるため，電源回路などやや大きな電力を扱うところでは巻線抵抗が良く使用される．このような巻線抵抗は，放熱特性を良くするため，中空円筒にしてほうろうで固めたり (ホーロー抵抗)，セメントで固めたもの (セメント抵抗) もある．

一方，簡単な加工で済み安価なため良く使用されるのが**炭素皮膜抵抗** (カーボン抵抗) である．ただし，温度特性，経年安定性，ノイズ特性のいずれにおいてもメタル抵抗に劣っている．

面実装用チップ抵抗に良く使用される抵抗体として，金属や金属酸化物をガラスと混合し，高温で焼結させたメタル・グレーズ皮膜がある (metal glaze resistor)．

1.5.2 抵抗値の表示

色	数値	倍率	許容差
黒	0	10^0	-
茶	1	10^1	±1%
赤	2	10^2	±2%
橙	3	10^3	±0.05%
黄	4	10^4	-
緑	5	10^5	±0.5%
青	6	10^6	±0.25%
紫	7	10^7	±0.1%
灰	8	-	-
白	9	-	-
金	-	10^{-1}	±5%
銀	-	10^{-2}	±10%
なし	-	-	±20%

電子回路部品は一般に大変小さく，部品名，端子 (足，リード) の名前，特性値など，部品上の印刷や形状から一義的にわかるよう，様々な工夫が凝らされている．固定抵抗器も，抵抗値や消費可能電力 (W 型) など，簡潔で紛れのない方法でわかるようになっている．W 型については，形状と大きさから判定することができる．

抵抗値の表示で，円筒形の抵抗器で良く使用されるのが，図 1.6(b)，(c) に見られる，**カラーコード**である．これは，国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission, IEC) の規格によるもので右の表のように決められている．円筒形抵抗器の場合，図 1.6(b)，(c) のように色のラインを付けておけばどの角度からも読め，間違いも少ないと期待できる．例えば，図 1.6(c) の中央の抵抗は，茶黒黒緑紫であるから，10MΩ で 0.1% 精度の高精度な抵抗 (これ程高い抵抗値では珍しい高精度) であることがわかる．

これに対して，図 1.6(a) のチップ抵抗の場合，3 桁ないし 4 桁の英数字が表示されている．これは，一番右側の数字が，これを q とすると，$\times 10^q$ の意味である．残りの左の 2 桁ないし 3 桁の数字が抵抗値の有効数字を表している．アルファベットの R，L が使用されていることがあるが，R は小数点を表し，L は mΩ 単位の小数点を表す．また，例を挙げると，1R5 → 1.5 Ω，2L00 → 2mΩ，1001 → 1kΩ などである．

図 1.6(d)，(e) のように直接値が印刷されている場合もある．

1.6 キャパシタ (コンデンサ)

高校物理以来なじみのあるキャパシタ (コンデンサ) [*2]は，いわゆる平行平板キャパシタで 2 枚の金属板を対向させて配置したものであろうが，実際に使用されているキャパシタも実質これに近い構造を持つものが多い．そうでないものも，多くはこの変形である．

1.6.1 可変キャパシタ

現在余り使用されることはなくなったが，かつては特にラジオ受信機には必ずと言って良い程アナログのダイアルが付いていてこの可変キャパシタ (variable capacitor) [*3]のシャフトを回転させるようになっていた．半円状の金属板を櫛の歯のように並べて一体として回転できるようになっており，同じような形状の金属板群と噛み合わせ回転角によりオーバーラップ面積 S が変化する．電気容量 ((1.4b) の C) は，高校物理で学んだように，平行平板型では板の間隔を d として，

$$C = \epsilon\epsilon_0 S/d \tag{1.6}$$

であるから，円盤状であればほぼ回転角に比例して C が変化する．図 1.7(a)，(b) は誘電体部分に空気を使用する空気キャパシタで，サイズが大きくても余り問題にならない真空管回路によく使用されていた．小さなラジオ等ではサイズを小さくすることが求められ，コイルのインダクタンスを大きくするためフェライトを入れて「バーアンテナ」としてアンテナと兼用し，誘電体にポリエチレンを使った図 1.7(c) のように小さなサイズのものが使用された．誘電

[*2] 電子回路に使用される capacitor も，かつては良く condenser とも呼ばれていたらしいが，英語では capacitor を使うのが普通になった．おそらく，化学実験等で使用する「凝結器」との混乱を避けるためと思われるが，日本ではこのような混乱もないせいか，かつての名残りで，高校物理以来コンデンサーと呼ばれている．ここでは，英語に合わせてキャパシタと呼ぼう．困るのは，アキバでもトラ技でもコンデンサーでないと通らないことで，受講者はその点注意．

[*3] 米英で何と言っているかは知らないが，日本では variable condenser を縮めて「バリコン」と呼ぶ．“varicap”というと，通常，回転式の空気キャパシタのことではなく，ダイオードの微分容量をバイアスで制御するタイプのものを指す．

(a) (b) (c) (d)

図 1.7　様々な可変キャパシタ．(a) 空気キャパシタ．絶縁体にステアタイトを使っていて，日本では「タイトバリコン」と呼ばれている．大電力用．(b) 2 連空気キャパシタ．(c) ポリエチレンキャパシタ．(d) セラミックキャパシタ (トリマー)．

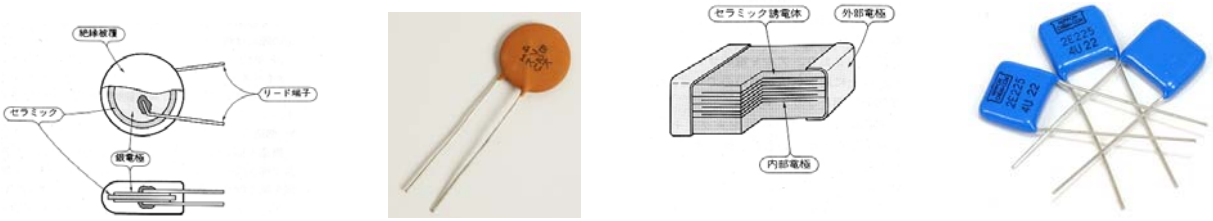
体では，その他，セラミック (図 1.7(d)) やマイカ，フィルム，サファイアなどが使われている．

1.6.2　(誘電体) 材料による分類

次に，固定容量キャパシタを見ていこう．キャパシタは，抵抗器以上に特に誘電体材料による特性差が大きいので，まずは誘電材料による違いを見ておこう．すでに出てきた空気キャパシタは平行平板型に近いものだが，主な用途は可変キャパシタである．

(a) セラミック・キャパシタ

次に比較的平行平板に近いものが，酸化物 (セラミック) を誘電体とするキャパシタである．構造的には**単板型**と**積層型**に分かれ，酸化物誘電体も低誘電率系，高誘電率系の 2 種類，更に温度特性や誘電正接などの特性を若干犠牲にしても高容量が必要な場合は，高誘電率酸化物にドーピングを行った半導体系，と呼ばれる材料が使われることもある．



(a) (b) (c) (d)

図 1.8　(a) 単板型セラミックキャパシタの構造，(b) 例．(c) 積層型セラミックキャパシタの構造，(d) 例．

単板型，積層型は文字通り一層の誘電体を単板で挟んだ構造になっているか，何層も重ねているかの違いである．単板型は図 1.8(a) のように簡単な構造であり，大抵 (b) のような外観をしていてわかりやすい．ただし，低誘電率材料，高誘電率材料で外形の差がないので，用途上問題になる場合，調べておく必要がある．積層型は，図 1.8(c) のように，可変空気キャパシタと同様，櫛状の金属平板を入れ子構造にして重ねているため，ほぼ積層数倍の容量が得られる．形状は (d) のように四角くなったり，その他様々で，後述のフィルムコンと区別がつかず，やはり調べておく必要がある．容量表示は 3 桁の数字の印刷によるものが多く，単位は pF である．

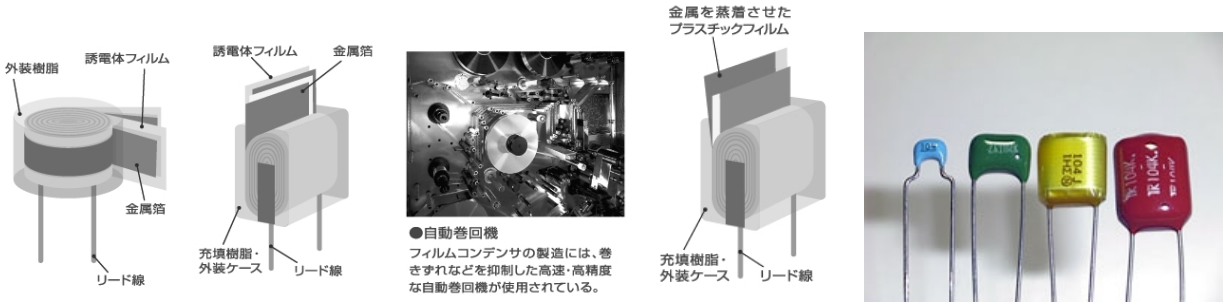
高誘電率酸化物としては，強誘電体のチタン酸バリウム ($BaTiO_3$) が使われることが多い．強誘電体であるため，比誘電率が極めて大きく大きな容量が得られるが，応答が非線形になり (電子回路業界では「容量が電圧に依存する」と表現する)，温度変化も大きい．更に，強誘電ドメインの形成とランダムな動きに伴うバルクハウゼン雑音も無視できず，電気容量が回路定数として問題になるような精密な計測回路には使用できない．ただし，高周波特性は固体を誘電体として使用するキャパシタの中では良好である．不純物ドーピングにより導電性を生じさせた場合，そのま

ま金属板で挟んでもリークが大きすぎてキャパシタとして使用できないため，ドープした材料を酸化膜で包んだり，金属板電極部分に堰層と呼ばれる薄い絶縁層を設けるなどの工夫をする．容量以外の諸特性は当然劣る．

(b) フィルム・キャパシタ

フィルム・キャパシタは，誘電体として有機ポリマープラスティックフィルムを用い，この両側に金属箔を配置，あるいは，フィルムに金属薄膜を蒸着したものを巻き込んだもの，あるいは，積層型にしたものである．良く使用されるポリマーは次のようなものである．

誘電体	略称	特徴
ポリエチレン・テレフタレート	PET	最も一般的な誘電体．耐熱・耐寒性に優れ，安価．ポリエステルとも呼ばれる．
ポリプロピレン	PP	絶縁抵抗が高く，低誘電正接 (低損失) のため，大電流用などにも適している．ただし耐熱性にやや劣る．
ポリフェニレン・スルフィド	PPS	耐熱性，温度特性に優れるが，高価．
ポリエチレン・ナフタレート	PEN	耐熱性に優れるが，温度特性において劣る．



(a) (b) (c) (d) (e)

図 1.9 箔電極フィルムキャパシタ (a) 巻回型 誘導巻き (b) 巻回型 無誘導巻き (c) 箔電極キャパシタの巻回機蒸着型フィルムキャパシタ (d) 巻回型無誘導巻き (e) フィルムキャパシタの外観．TDK web ページ http://www.tdk.co.jp/techmag/electronics_primer/vol4.htm より．

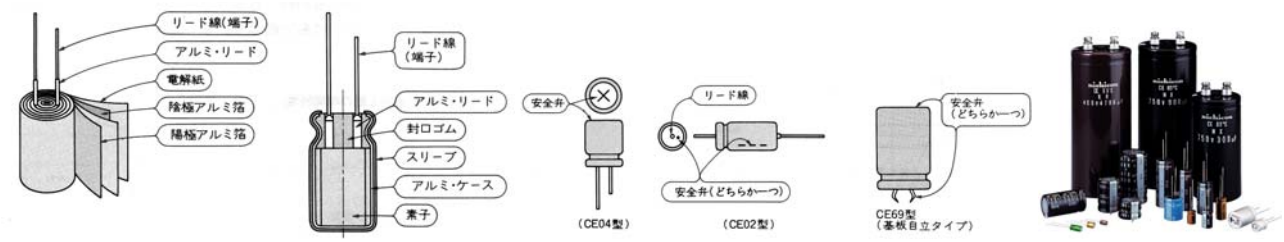
図 1.9(a)，(b) は箔電極を使ったキャパシタの構造模式図だが，(a) では一様に重ねて巻きつけ，巻き出し部分と巻き終わりで両側の箔電極からリード線を出しており，巻いたことで電極がコイルとして働きインダクタンスを生じている．これに対して，(b) では箔電極を表と裏でずらしておき，側面からリード線を引き出すことでインダクタンス成分を失わせる無誘導巻きになっている．蒸着膜を使用しても，(d) のように原則同じである．外観は (e) のように様々であり，外観からの判断は危険である．

フィルム材質にもよるが，一般に損失 (誘電正接) は小さく，直線性にも優れ，ノイズもセラミックと比較すると少ないため，低周波計測回路に適している．高周波特性も巻回方にもよるが，比較的良好である．大きな容量のものが作りにくいのが欠点である．

(c) 電解キャパシタ

キャパシタの片側の電極に電解質を用いたものを**電解 (質) キャパシタ** (electrolytic capacitor) と呼ぶ．もう片側の電極には，アルミニウムの片面を酸化して酸化アルミニウム (Al_2O_3) にしたものを用い，この Al_2O_3 層を誘電体として使用する．図 1.10(a) に示したように，電解質として電解液を電解紙にしみこませたものを使用することが多い．固体電解質を用いる場合もある．

製造工程では，アルミニウム箔表面を電解エッチすることでポーラス状の凹凸が非常に激しく従って表面積が非常に大きな構造としながら同時に極めて薄い Al_2O_3 膜を形成する．電解液含浸の電解紙を接触すると，このポーラス状表面の凹凸に電解液が浸透して誘電体が薄く巨大な面積のキャパシタが現れる．反対側には自然酸化膜状態のアル



(a) (b) (c) (d)

図 1.10 (a) 電解キャパシタの構造模式図 (b) パッケージ内部模式図 (c) パッケージ外観 (d) 様々な電解キャパシタ.

ミ箔を貼って絶縁膜と一緒に巻き込むことで大きな容量を持つキャパシタを作ることができる.

このように非対称な構造しているため**極性**が生じる．ポーラス酸化膜の耐圧内では持続的電流は流れないが，外部電圧が変化すると電極内には過渡電流が流れる．自然酸化膜側で酸素が発生する向きに電流が流れると，酸化膜が厚くなって著しい性能劣化を起こしたり，最悪の場合，気体酸素圧力によってパッケージが破損し電解質が飛び散る事故が生じる．図 1.10(c) で「安全弁」とあるのはこのような誤配線による圧力の逃しである.

図 1.10(b)-(c) に示したように，何種類かのパッケージがあるが，類似性があり，(d) のように外観から電解キャパシタであることは比較的容易に判断できる.

(d) **タンタル・キャパシタ**

タンタル・キャパシタもアルミニウム電解キャパシタと類似のものであるが，温度特性，周波数特性が大幅に改善されている.

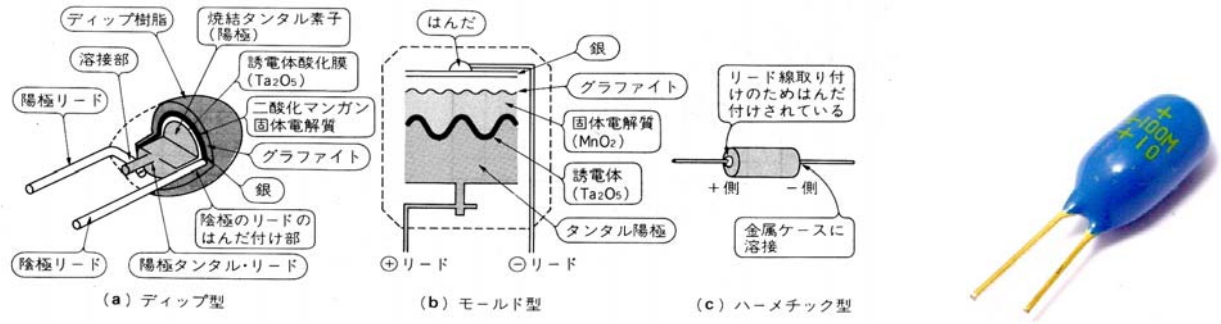
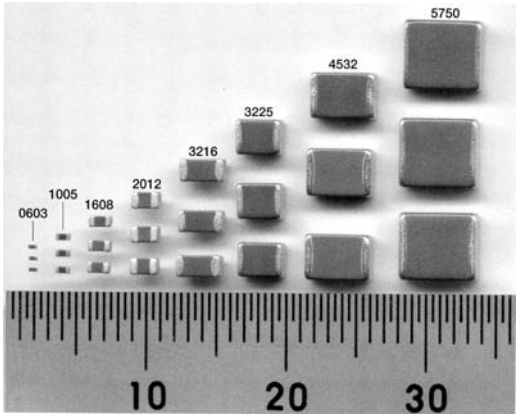


図 1.11 タンタル焼結体固体電解キャパシタの構造.

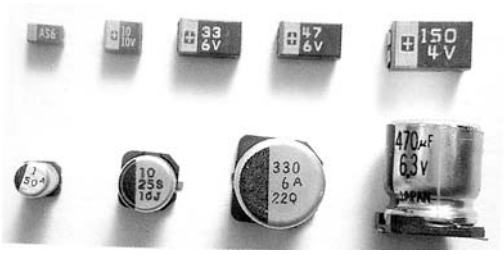
タンタル・キャパシタの工程の一例を挙げると，タンタル粉末を焼き固めて焼結体として有効大面積を作り，陽極酸化法により酸化物誘電体を形成する．これを硝酸マンガン液に浸して加熱することで固体二酸化マンガン層 (電解質) を形成する．これにグラファイトと銀ペーストで電極 (陰極) を形成する.

1.6.3 面実装用チップ型キャパシタ

以上述べてきた様々な固定キャパシタの殆どについて面実装用のチップ型のものが開発され，売りだされている．大量に安価に，かつ極めて小さく作製するため様々な技術が開発され，これも大変面白いものであるが，余りにも「トラ技」的知識に深入りするので，図 1.12 にそれらの一部の写真を掲載するに留める．興味がある方は，[5] などを参照して欲しい.



(a)



(b)

図 1.12　(a) チップ型積層セラミックキャパシタ (b) 上列：チップ型タンタル・キャパシタ．　下列：チップ型電解キャパシタ．

1.7　インダクタ

(1.4c) で L を有する素子の代表は，導線をらせん状に巻いた**コイル**である．積層キャパシタでは，金属板電極を櫛の歯状に多層にして入れ子にすることで面積を稼いでいたが，コイルは，やはり円環電流を縦方向に積層することで実効面積を稼いでいると考えることができる．キャパシタは非常に遠方から見れば電気双極子と見ることもできるが，この点からは，インダクタはやはり遠方から見て磁気双極子に見える素子と考えることもできる．

1.7.1　可変インダクタ

キャパシタの (1.6) に相当するコイルのインダクタンス L の表式は

$$L = \mu \frac{N^2}{l} S = \mu n N S \tag{1.7}$$

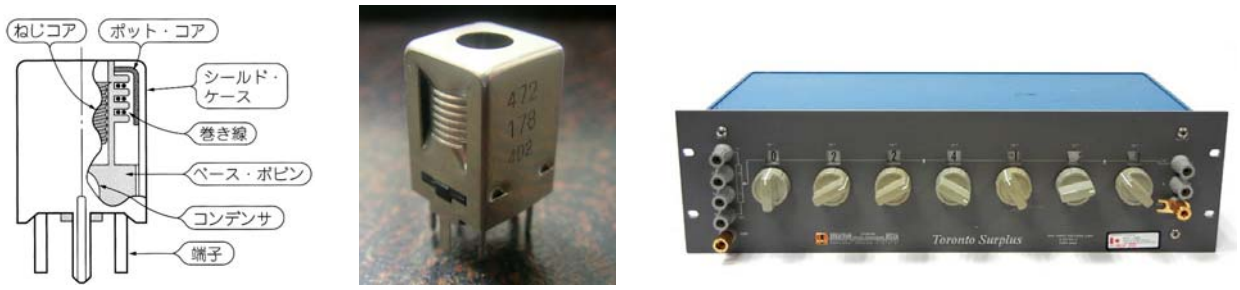
である．ここで，μ はコイル内物質の透磁率，N は巻き数，l はコイル長，S はコイル断面積，n は線密度である．可変キャパシタでは主に S を変化させていたが，コイルではこれは難しい．一つの方法は，コイル内に磁性体を出し入れして有効な μ を変化させることで可変インダクタとする．また，抵抗器同様，ロータリースイッチでコイルを切り替えて高精度・広範囲の可変インダクタとするものもあるが，抵抗器同様の問題がある．

図 1.13 はそのような例を示している．(a)，(b) に示した小型のものでは，フェライトにネジが切られており，ケース上からドライバで回転することでフェライトをコイルに出し入れし，インダクタンスを変化させる．(c) はロータリースイッチでコイルを切り替える形式のもので，7 桁の高精度を出すことができる．調整とコイル巻きは職人の技術に頼っているので，最近は高精度のものができなくなりつつある．

1.7.2　固定インダクタ

固定インダクタも，ほとんどは磁性体入りのコイルか，あるいは空芯のコイルである．かつては無線機器のサイズも大きく，トランジスタ回路であってもコイルはそれとわかるものが多かったが，小型化してケースに入れられるようになり，更に面実装用のチップインダクタなって他の部品と区別がつかないものも増えてきた．面実装用のトランスも実用化されている．

特に高密度化によって重要になってきたのが，図 1.14(a)，(b) に示した開磁路，閉磁路の違いである．開磁路インダクタは，磁性体で作ったドラムの周りに導線を巻きつけただけのもので，発生磁束の外部漏洩，外部磁束の捕獲が大きく，回路内部のクロストークが問題になる．閉磁路インダクタは，その外側に磁性体の円筒をかぶせた形状をしており，形状も大きくなりコストも上がるが，漏洩磁束は激減し，高密度実装が可能になる．通常の小型固定イン



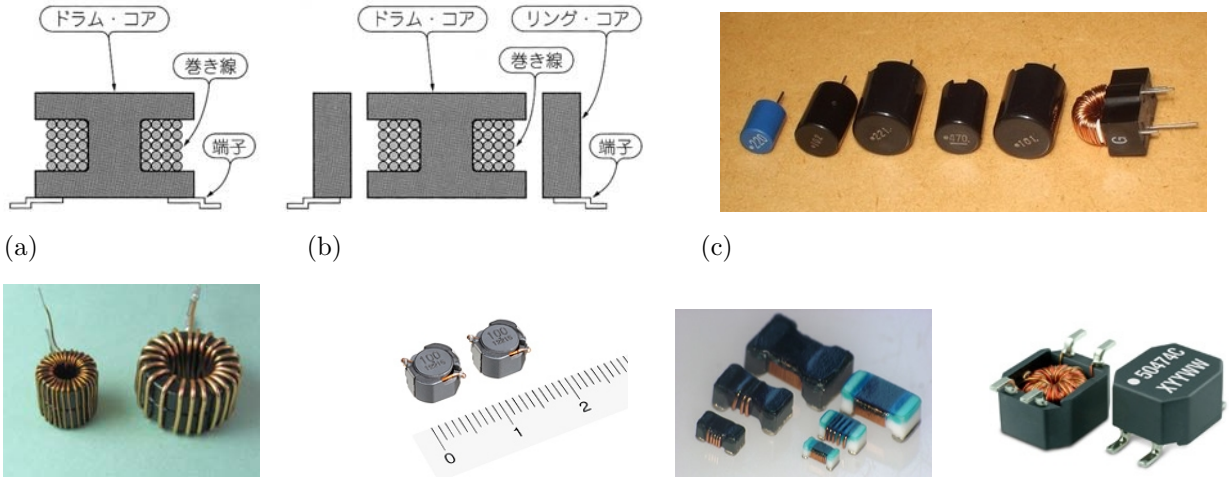
(a) (b) (c)

図 1.13　(a) 小型可変インダクタ構造の一例．(b) 外観写真．(c) ディケイドトランスと呼ばれる，ロータリースイッチによるコイル切替器．

ダクタは，図 1.14(c) のように，コイル形状から円筒形をしていることが多い．外側の円筒が磁気シールドになっている．

(d) のトロイダル (コア)・コイルは，古くから電源回路などに使用されているが，芯の磁性体，コイルが円環状になっていて，これも磁束漏洩がなく，大きな電流が流れてもノイズを発生しにくい特徴がある．

これらの固定インダクタは，(e) - (g) に示したように様々な方法で面実装用のチップインダクタとして発売されている．



(a) (b) (c)

(d) (e) (f) (g)

図 1.14　(a) 開磁路インダクタ．(b) 閉磁路インダクタ．(c) 様々なインダクタ．一番右はトロイダル・コイル．(d) やや大型のトロイダル・コイル．(e) 閉磁路チップインダクタ．(f) 開磁路チップインダクタ．(g) トロイダル・チップインダクタ．

第 2 章 線形回路序論

電子回路の動作解析の上で線形システム論はたいへん重宝であり，一方，線形システム論を具体的にモデリングする上で電子回路は極めて便利である．双方にとって欠くべからざる存在であり，電子回路の理解に軸足を置きつつ線形システム・応答論についても議論を進めていくことにしよう．

2.1 線形システムと電子回路

2.1.1 線形システムとは

任意定数 C_1，C_2，変数 x_1，x_2 に対して

$$f(C_1x_1 + C_2x_2) = C_1f(x_1) + C_2f(x_2) \tag{2.1}$$

が成立するとき，関数 f は線形であった．このように変数の 1 次結合を入力したとき，出力が各変数に対する出力の同じ 1 次結合で表されるときに入力 → 出力の関係を線形と呼ぶのであるから，**線形システム** (linear system) とは，図 2.1 のように入力が複数入力の 1 次結合で表されるとき，システムの応答 (出力) がそれぞれの入力への応答の同じ 1 次結合で表されるような系のことを呼ぶ，として良さそうである．

2.1.2 伝達関数

改めて，定義をしよう．システムが，時間 t に依存する入力 $u(t)$ を受け取り，$w(t)$ を出力する，とする．これを，汎関数 $\mathscr{R}$ を使って

$$w(t) = \mathscr{R}\{u(t)\} \tag{2.2}$$

と書く．$\mathscr{R}$ の性質として，物理系では次の 2 つが要請される．

不変性　システムの伝達特性が，時間によって変化しないこと．

$$\text{任意の時間 } t_1 \text{ に対して} \quad w(t - t_1) = \mathscr{R}\{u(t - t_1)\} \tag{2.3}$$

因果性　原因 u がない時には，結果 w も現れない．

$$u(t) = 0 \ (t < t_1) \ \rightarrow \ w(t) = 0 \ (t < t_1)$$

これらの前提の上で，次の**重ね合わせの原理** (principle of superposition) が成り立つ場合，システムは線形である，という．任意の複素定数 C_1，C_2 に対して

$$\mathscr{R}\{C_1u_1(t) + C_2u_2(t)\} = C_1w_1(t) + C_2w_2(t). \tag{2.4}$$

入力がデルタ関数 $\delta(t - t_1)$ である時の応答を**インパルス応答** (impulse response) と呼ぶ．これを

$$\xi(t, t_1) = \mathscr{R}\{\delta(t - t_1)\} \tag{2.5}$$

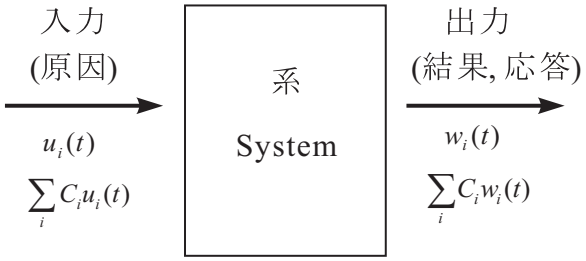


図 2.1　線形システムの概念図．$u_i(t)$ が時間 t に依存する入力，$w_i(t)$ がそれに対応する出力とする．

のように書こう．(2.4) は，2 つの項の和についての定義であるが，これを多数の項 $\sum_i C_i u_i(t)$ に拡張することは容易である．更に，これを連続形として積分に拡張する．

$$w(t) = \mathscr{R}\{u(t)\} = \mathscr{R}\left\{\int_{-\infty}^{\infty} u(t')\delta(t-t')dt'\right\} = \int_{-\infty}^{\infty} u(t')\mathscr{R}\{\delta(t-t')\}dt' = \int_{-\infty}^{\infty} u(t')\xi(t,t')dt'. \tag{2.6}$$

$\xi(t,t')$ は重み関数 (weight function) とも呼ばれるが，その理由は上式から明らかである．

$\delta(t)$ に対する応答を $\xi(t)$ と書くと，(2.3) より，$\xi(t,t_1) = \xi(t-t_1)$ である．(2.6) より，

$$w(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t')\xi(t-t')dt' = \int_{-\infty}^{\infty} u(t-t')\xi(t')dt' \tag{2.7}$$

となる．これはいわゆるたたみこみ (convolution) である．

ここまで，すべて時間軸上 (時間領域) で話を進めてきたが，周波数空間で考えることもできる．この 2 つの空間における事象表現は，**フーリエ変換** (Fourier transform) で結ばれている．すなわち，時間領域での事象表現を $x(t)$，その周波数領域での表現を $X(\omega)$ とすると，

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t}dt, \quad x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{i\omega t}\frac{d\omega}{2\pi} \tag{2.8}$$

である．関数 $x(t)$ のフーリエ変換 $X(\omega)$ を $X(\omega) = \mathscr{F}\{x\}$ のように表し，$U(\omega) = \mathscr{F}\{u(t)\}$，$W(\omega) = \mathscr{F}\{w(t)\}$，$\Xi(\omega) = \mathscr{F}\{\xi(t)\}$ とする．(2.7) の両辺のフーリエ変換を取ると，

$$W(\omega) = U(\omega)\Xi(\omega) \tag{2.9}$$

となる．この時，$\Xi(\omega)$ をこのシステムの**伝達関数** (transfer function) という．

参考文献

[1] 高橋秀俊，藤村靖，「高橋秀俊の物理学講義——物理学汎論 (ちくま学芸文庫)」 (筑摩書房，2011).

[2] 霜田光一，「エレクトロニックスの基礎」(裳華房，1963).

[3] 薊 利明，竹田俊夫，「わかる電子部品の基礎と活用法」 (CQ 出版社，1996).

[4]「コンデンサ/抵抗/コイル活用入門—電子回路の性能を決める受動部品の基礎と応用」 (トランジスタ技術 SPECIAL) (CQ 出版社，2005).

[5]「抵抗&コンデンサ活用ノート」 (トランジスタ技術 SPECIAL) (CQ 出版社，2008).