

物理屋のための電子回路論 第3回

勝本信吾

東京大学理学部・理学系研究科 (物性研究所)

2015年10月22日

2.3 回路網

2.3.1 キルヒホッフの法則

2.3.2 インピーダンスの合成

都合により，若干節の構成を変更し，少し集中定数回路について一般的に成立し，かつ基礎的な定理について見ておくこととし，すでに説明したキルヒホッフの法則とインピーダンスの合成についてはこの「回路網」節に属するものとする。

2.3.3 重ね合わせの定理

線分とそれらの結節点の集合をこれらのトポロジカルな関係に抽象化して議論するのが，グラフ理論と呼ばれるものであり，集中定数回路概念は電子回路をグラフ理論的に扱うための抽象化であると捉えることもできる。すなわち，金属で接続された等電位点を節 (node)，2端子素子を枝 (branch) とする。ここでは枝の向きも考慮する有向グラフ (directed graph, digraph) を考える。

回路網が，起電力と線形な素子のみで出来上がっている場合は，すべての節と閉回路を考えてキルヒホッフの法則を適用して連立一次方程式が得られ，すべての枝を流れる電流を計算することができる。今，すべての枝を起電力 E_i ($i = 1 \dots m$) と抵抗 R_i により構成されるとする (単なる直結の場合は $E_i = R_i = 0$)。すると，第2法則から，

$$A\{R\} \begin{pmatrix} J_1 \\ \vdots \\ J_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_m \end{pmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{pmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_m \end{pmatrix} \quad A \text{ は } \mathbf{R} \text{ の } 1 \text{ 次の行列} \quad (2.32)$$

である。電流分布 \mathbf{J} は $A^{-1}\mathbf{V}$ から得られることになる。この線形性より次の定理が容易に得られる。

重ねあわせの定理

回路網中に多くの起電力が存在する時の電流は，各起電力が単独に存在する時の電流分布を重ね合わせたものに等しい。

2.3.4 鳳-テブナンの定理

鳳-テブナンの定理は次のようにまとめることができる。

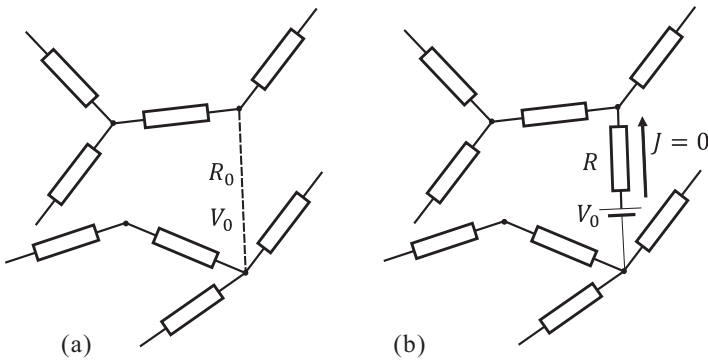


図 2.4 鳳-テブナンの定理の証明

鳳-テブナンの定理

電流の流れている回路網内の任意の2点を、新たに抵抗 R でつなぐ。つなぐ前の2点間の電圧を V_0 、回路内の起電力をすべて短絡して2点間の抵抗を測定した時の値を R_0 とすると

$$J = V_0 / (R + R_0) \quad (2.33)$$

となる。これは、起電力 V_0 、内部抵抗 R_0 の電源に負荷抵抗 R をつないだ時の電流である。

これは、重ねあわせの定理より次のように簡単に証明される。問題の2点間を R と起電力 V_0 でつなぐ(図 2.4) と R の両端の電圧は零であり、電流は流れない。この状態で、この V_0 以外の回路網中の起電力をすべて零にすると、 V_0 に対して R と R_0 の直列回路がつながっていることになるので、流れる電流 J_0 は $-V_0 / (R + R_0)$ である。重ねあわせの定理より、最初の「電流が流れない」条件は $J + J_0 = 0$ であることから、(2.33) が得られる。

鳳-テブナンの定理は、実際に電気回路を相手にして回路図等の詳細な情報が与えられていない時に必要な情報を実験的に得る際などに適用され、応用性の高い定理である。

2.3.5 テレヘンの定理

有向グラフの節、枝にそれぞれ指数 $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$ を付け、

$$a_{ij} = \begin{cases} 1: & \text{節 } i \text{ が枝 } j \text{ の始点,} \\ -1: & \text{節 } i \text{ が枝 } j \text{ の終点,} \\ 0: & \text{節 } i \text{ は枝 } j \text{ の端点でない} \end{cases} \quad (2.34)$$

とする $n \times m$ 行列 $\{a_{ij}\}$ を考える。これを接続行列 (incidence matrix) という。

すべての j について枝 j は2つの端点を持ちこれらの a_{ij} の和はゼロ、その他の要素はゼロである。すなわち、

$$\forall j: \sum_{i=1}^n a_{ij} = 0$$

であって、これより接続行列のうち1つの行は消去しても行列の有する情報は変化しない。これは、節のうちどれを接地電位に取るかという任意性が残っていることに相当する。そこで適当に1行を消去した $(n-1) \times m$ 行列 D を考え、既約接続行列 (irreducible incidence matrix) と呼ぶ。なお、回路が途中で切断されていない連結グラフについて考えている。

D と (2.32) で導入した各枝を流れる電流 J_j (枝の「向き」を正に取る。その他の物理量についても同じ) を並べたベクトル \mathbf{J} を用いて、キルヒホッフの第1法則は

$$D\mathbf{J} = \mathbf{0} \quad (2.35)$$

と表現することができる。更に、各節の電位 W_i を並べたベクトルを \mathbf{W} 、各枝にかかる電圧 V_j を並べたベクトル \mathbf{V} を導入する。枝 j の両端点節のインデックスが i, k で、 $i \xrightarrow{j} k$ の関係にあるとすると、 $V_j = W_i - W_k = a_{ij}W_i - a_{kj}W_k$

であるから、

$$\mathbf{V} = {}^t\mathbf{D}\mathbf{W} \quad ({}^t\mathbf{D} \text{ は } \mathbf{D} \text{ の転置行列}) \quad (2.36)$$

である。これは、各節の電位が一つの値に定まる、ということで、キルヒホッフの第2法則を表している。

従って

$$\sum_{i=1}^m V_i J_i = ({}^t\mathbf{D}\mathbf{W}) \cdot \mathbf{J} = {}^t\mathbf{W}\mathbf{D}\mathbf{J} = 0 \quad (2.37)$$

である。すなわち、電圧ベクトルと電流ベクトルとは直交している。これが**テレヘンの定理** (Tellegen's theorem) と呼ばれるものである。

(2.37) は、ある回路のある瞬間の \mathbf{V} と \mathbf{J} に関するものであるとするならば、回路全体としてエネルギーの変化がないことを表しているが、それは、電荷保存と電場の一価性すなわちキルヒホッフの法則に基づくものである。枝のトポロジカルな結合関係を表す行列 \mathbf{D} と \mathbf{V} , \mathbf{J} との関係 (2.35) および (2.36) のみから導かれており、これら2つの関係式は、 \mathbf{D} が同じ回路であれば、物理的に異なるものであっても成立するから、(2.37) も成立する。線形性も仮定されていない。

テレヘンの定理

ある回路の電圧ベクトルと、これと同じトポロジカルな接続関係を持つ回路の電流ベクトルとは直交している。

2.4 4端子(2端子対)回路

これまで2端子の素子を単位として線形回路を議論してきた。金属を用いた電気信号の伝播には、例えば信号ラインと接地ラインなど何らかの意味で2つの金属が必要となる。これらに2つの端子を対応させ、**端子対** (terminal pair) として扱うことが良く行われる。端子対には同じ大きさで逆向きの電流が流れる、という境界条件を課す。これまで扱ってきた2端子素子、これらを組み合わせた2端子回路は1端子対回路と見ることができる。

そこで、端子対を1つ増やして2端子対回路 (two-terminal pair circuits) を考えよう。全部の端子数は4であるため、4端子回路と呼ばれることも多い。4つの端子を出した回路とは、対をなす端子間の電流に特別な境界条件が課された形になっている。これは、入力 → 出力の最小ブロックであり、更に回路の構成ブロックとすることが良く行われる。

2.4.1 4端子回路の定義

4端子回路を図2.5のように回路をブラックボックス化して表す。

4端子回路パラメタの取り方として、出力端子の J_{out} , V_{out} を使って入力端子の電流電圧 J_{in} , V_{in} を表す、というものがある。4端子回路はすべて線形素子で構成されているとする。線形性より、 J , V 等はすべて ω 空間 (あるいは s 空間) 要素 $\mathcal{J}(i\omega)$, $\mathcal{V}(i\omega)$ と置きかえても良い。4端子回路は、インピーダンス (アドミッタンス) のネットワークと見ることができ、直流抵抗回路網と同様の合成解析ができる。端子対の仮定から、電流は対をなす端子間で還流

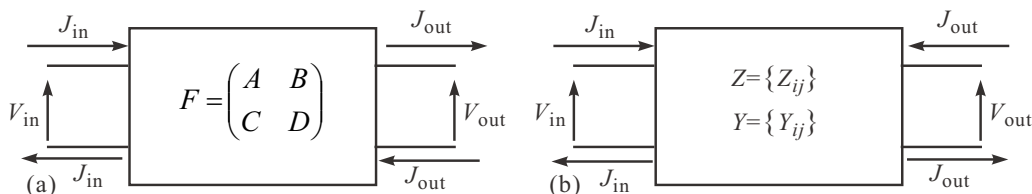


図2.5 (a)4端子回路の概念図。F行列に使う外部パラメタ。(b)インピーダンス行列、アドミッタンス行列のためには、外部電流の向きを対称に取る。

	A	B	C	D
直列素子	1	Z	0	1
並列素子	1	0	$\frac{1}{Z}$	1
T 型	$1 + \frac{Z_1}{Z_2}$	$\frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_3 Z_1}{Z_2}$	$\frac{1}{Z_2}$	$1 + \frac{Z_3}{Z_2}$
π 型	$1 + \frac{Z_1}{Z_3}$	Z_1	$\frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{Z_2 Z_3}$	$1 + \frac{Z_1}{Z_2}$

表 2.1 2 端子素子を接続して作った 4 端子回路と F 行列

する境界条件を与える。この時、回路の線形性より

$$\begin{pmatrix} V_{in} \\ J_{in} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{out} \\ J_{out} \end{pmatrix} \equiv F \begin{pmatrix} V_{out} \\ J_{out} \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

と表すことができるはずである。この F は **4 端子行列** と呼ばれるものの一種で、特に F 行列あるいはカスケード行列と呼ばれる。 A, B, C, D を 4 端子定数、あるいは F パラメタと呼ぶ。(2.38) はまた、次のように書くこともできる。

$$A = \left(\frac{V_{in}}{V_{out}} \right)_{J_{out}=0}, \quad B = \left(\frac{V_{in}}{J_{out}} \right)_{V_{out}=0}, \quad C = \left(\frac{J_{in}}{V_{out}} \right)_{J_{out}=0}, \quad D = \left(\frac{J_{in}}{J_{out}} \right)_{V_{out}=0}. \quad (2.39)$$

入力と出力を交替して、

$$\begin{pmatrix} V_{out} \\ J_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{in} \\ J_{in} \end{pmatrix} \equiv K \begin{pmatrix} V_{in} \\ J_{in} \end{pmatrix} \quad (2.40)$$

という書き方も可能である (K 行列)。

F 行列は入力と出力をつないでいるものの、因果律を表しているわけではない。また、状況により回路の記述に便利なパラメタは変化する。以下に、そのような様々なパラメタに対応する行列を示す。ただし、対称性のため、 J_{out} の向きを図 2.5(b) のように F 行列とは反対にとる。

$$\begin{pmatrix} V_{in} \\ V_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_{in} \\ J_{out} \end{pmatrix} \equiv Z \begin{pmatrix} J_{in} \\ J_{out} \end{pmatrix} \quad (2.41)$$

$$\begin{pmatrix} J_{in} \\ J_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{in} \\ V_{out} \end{pmatrix} \equiv Y \begin{pmatrix} V_{in} \\ V_{out} \end{pmatrix} \quad (2.42)$$

Z をインピーダンス行列、 Y をアドミッタンス行列と呼ぶ。この他にもハイブリッド (h) 行列、散乱 (S) 行列など、良く使われるパラメタ行列がある。これらは、それぞれ、トランジスタ、高周波回路の項で改めて説明する。

2.4.2 4 端子回路の接続

図 2.6(a) のように 4 端子回路の出力を次の入力として次々と繋いでゆくことをカスケード接続と呼んでいる。全体の F 行列は簡単に

$$F_{\text{tot}} = \prod_{i=1}^N F_i \quad (2.43)$$

となる。F 行列をカスケード行列と呼ぶ所以である。一方、2 端子回路の直列接続に相当するのは、電圧が加算されるような接続法であるから、図 2.6(b) のようになる。この時はインピーダンス行列を使うのが便利で合成回路のインピーダンス行列は $Z = Z_1 + Z_2$ と和で表される。同様に並列接続図 2.6(c) では、合成回路のアドミッタンス行列は $Y = Y_1 + Y_2$ となる。表 2.1 に 2 端子素子を接続して色々な 4 端子回路を形成した場合の F 行列についてまとめた。このような受動素子による 4 端子回路で、物理実験で良く使われるのが、フィルター回路である。例えば、T 型の回路で、 Z_1 、 Z_3 にインダクタ、 Z_2 にキャパシタを使えば、T 型ローパスフィルターとなる。

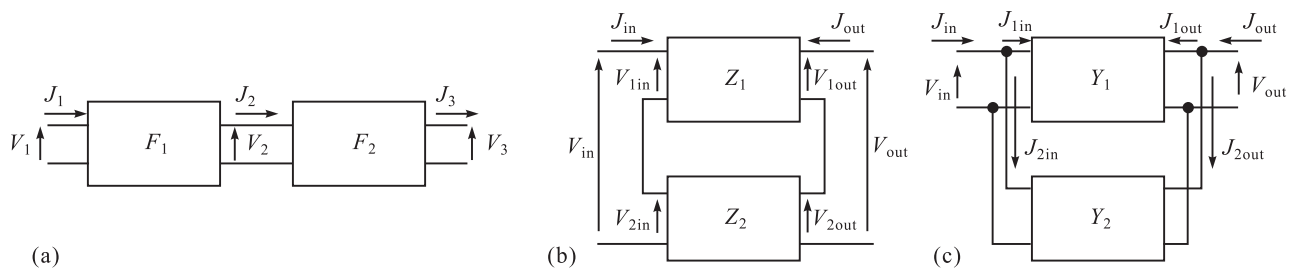


図 2.6 (a) 4 端子回路のカスケード接続. (b) 直列接続. (c) 並列接続

2.5 端子対回路の諸定理

「回路網」の項でいくつかの回路定理を紹介した。これらは、端子対回路という制約の下でも当然成立する。また、端子対回路特有の定理も存在する。

重ね合わせの定理

図 2.7(a) に示すように (この例は、4 端子回路ではなく 6 端子回路であるが)、電圧、または電流を決めている境界条件が複数あり、別の端子対に負荷を接続した場合、負荷に流れる電流は、それぞれの電源の「出力値」をゼロにした時の値の和となる。

鳳-テブナンの定理

6 端子回路で見ると、図 2.7(b) のようになる。すなわち、6 端子回路に電源が 2 つ、インピーダンス Z が接続されている時、 Z に流れる電流 J は、 Z を開放した時に生じる電圧を V_o 、電源の出力をいずれもゼロにした時に出力側から測定したインピーダンスを Z_i とし、 $J = V_o / (Z + Z_i)$ と書くことができる。

ノートンの定理

鳳-テブナンの定理のアドミッタンス版。図 2.8 のように、鳳-テブナンでインピーダンスと見たところをアドミッタンス Y と考え、 Y の両端に現れる電圧 V を求める。まず、 Y を短絡して流れる電流 J_s を測定する。次に、 Y を開放して電源の出力をいずれもゼロとし、出力側から測定したアドミッタンスを Y_i とすると、

$$V = \frac{J_s}{Y + Y_i} \quad (2.44)$$

である。

補償の定理

これも鳳-テブナンの定理の言い換えである。やはり、電源がつながった回路の中のインピーダンス Z を考える。左図の状態で電流 J が流れていたとする。インピーダンスが ΔZ だけ変化し、中央図のように、これを補償する電源 ΔV をつないで、 J が変化しないように調整する。 $\Delta V = J\Delta Z$ である。次に右図のように電源の出力を例によってゼロにし、更に上記補償電源の向きを逆転する。この時、各導線に流れる電流 ΔJ_i は変化 ΔZ による電流変化を抽出したものである。

これは、中央の図と右の図を「重ね合わせ」で見れば明らかである。

相反定理

4端子回路における相反定理は物理的には様々な表現ができる。以下、2種類紹介する。ここでは例によって直流の線形素子(起電力, 抵抗)による回路網に話を限るが、交流の場合もキルヒホッフの法則同様、複素数への拡張によって同様な定理が成立する。4端子回路, 相反定理をめぐる, 様々な物理の結びつきが [1] に紹介されている。

相反定理 (コンダクタンス): 4端子回路の入力, 出力は便宜的な区別に過ぎないので, これを a, b と称する。a に起電力 V をつなぎ, b を短絡した時に, b に流れる電流は, 逆に b に V をつないで a を短絡した時に a に流れる電流に等しい。これは, アドミッタンス (今の場合コンダクタンス) 行列で $Y_{12} = Y_{21}$ となっていることを示している。

相反定理 2(抵抗): a に定電流源 J をつなぎ, b を開放した時に, b に発生する電圧は, 逆に b に J をつないで a を開放した時に a に発生する電圧に等しい。これは, インピーダンス (今の場合抵抗) 行列で $Z_{21} = Z_{12}$ となっていることを示している。

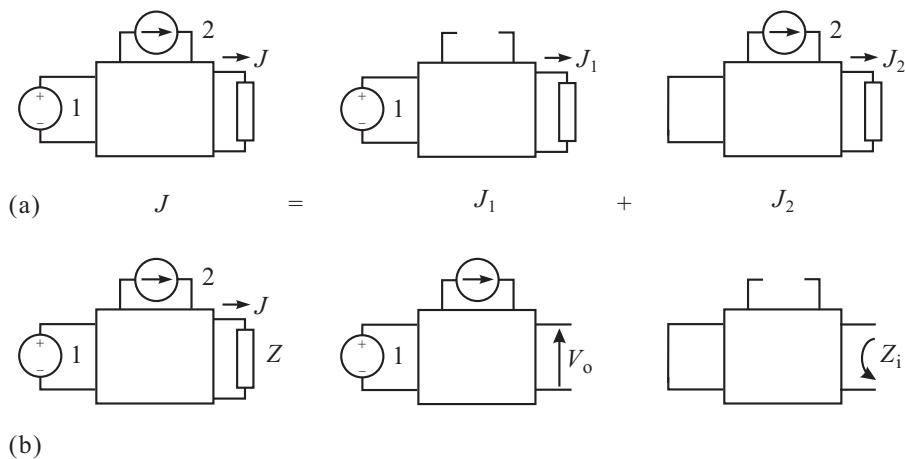


図 2.7 (a) 重ね合わせの定理. 左側の回路で右の抵抗器を流れる電流 J は, 右辺第 1 項, 定電流電源をオープンにした場合に流れる電流 J_1 と, 第 2 項, 定電圧電源をショートした時に流れる電流 J_2 との和である. (b) 鳳-テブナンの定理. インピーダンス Z に流れる電流 J は, Z を開放した時に生じる電圧を V_o , 電源の出力をいづれもゼロにした時に出力側から測定したインピーダンスを Z_i として, $J = V_o/(Z + Z_i)$.

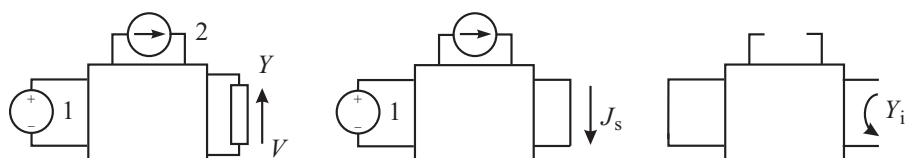


図 2.8 ノートンの定理. アドミッタンス Y に生じる電圧 V は, Y を短絡した時に流れる電流を J_s , 電源の出力をいづれもゼロにした時に出力側から測定したアドミッタンスを Y_i として, $V = J_s/(Y + Y_i)$.

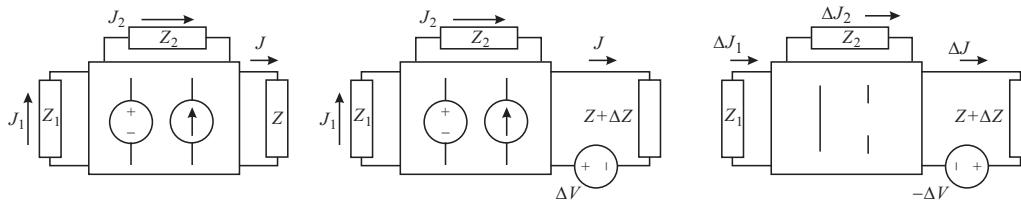


図 2.9 補償の定理. 本文参照.

以上から、相反定理が成り立つ場合には、 F 、 Z 、 Y の各行列の要素間に

$$Z_{11} = \frac{A}{C}, \quad Z_{22} = \frac{D}{C}, \quad Z_{12} = Z_{21} = \frac{1}{C} \quad (2.45)$$

$$Y_{11} = \frac{D}{B}, \quad Y_{22} = \frac{A}{B}, \quad Y_{12} = Y_{21} = -\frac{1}{B} \quad (2.46)$$

という関係が成立する。また、これより

$$|F| = AD - BC = 1 \quad (2.47)$$

であることもわかる。

2.6 双対性

これまで調べてきた回路の性質に現れた**双対性** (duality) について見ておこう。これは、インピーダンスとアドミッタンスのようにある種の対立概念がある時、対立概念のセットを入れ替え、場合によっては概念間の論理関係も入れ替えるなどの操作 (双対変換 duality transformation) を行うことで、対応定理が成立するとき、2組の概念セットの間に双対性がある、というものである。これら概念セットのことを双対空間 (dual space) と呼ぶことがある。2つの空間の間に双対性があれば、一方の空間で成立する様々な定理・性質は双対変換によって双対空間でも成立することになる。

直列接続	並列接続
開放	短絡
電場	磁場
キルヒホッフの第2法則	キルヒホッフの第1法則
電圧	電流
インピーダンス	アドミッタンス
抵抗	コンダクタンス
静電容量	インダクタンス
鳳-テブナンの定理	ノートンの定理

表 2.2 電子回路基礎概念間の双対性の例.

表 2.2 に、これまでに現れた電子回路に関する双対関係にある基礎概念の例を示した。前回の講義でメタな関係を共有する物理系間の平行論 (parallelism) について簡単に述べたが、平行論においては関係する系の間には直接的な物理的な関係はなかったのに対し、双対関係は一般に密接な物理関係を有する点が大きな違いである。多くは双対変換が逆数や積分の逆変換となるなど、対極的な関係にある。

2.7 受動素子と能動素子

これまで、抵抗、キャパシタ、インダクタについて、特に定義をせずに**受動素子** (passive elements) と呼んできた。ここで、**能動素子** (active elements) との違いを見ておく。

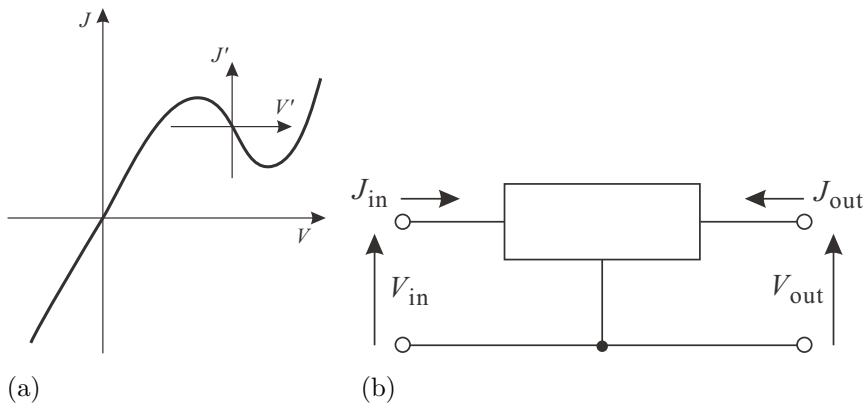


図 2.10 (a) 2 端子素子で局所的に電流が負になり得る I-V 特性の例. (b) 3 端子素子を 4 端子回路として接続する.

2 端子回路に流れる電流 J と電圧 V を考えた時に、これらの積 JV が常に正になる回路を受動回路と呼ぶ。ただし、この「電流」、「電圧」として、局所相対値を取ることを許す。この「回路」の部分が素子であればこれは受動素子、ということになる。絶対値としての JV が負になるということはエネルギーの湧き出しがあるので、電源を含まない回路ではあり得ないことになるが、局所相対値を考えると、例えば右図 2.10(a) のように I-V 特性にピークを持つ素子の場合、元の J, V に平行な局所座標 $J'-V'$ を取ると $J'V'$ が負になる領域がある。このような素子は、2 端子能動素子と呼ばれている。

次に、3 端子の回路について、図 2.10(b) のように、4 端子回路として扱い、2 端子の場合と同様、局所相対値まで考えて $P = J_{in}V_{in} + J_{out}V_{out}$ が常に正であるような場合、この 3 端子回路は受動回路であるという。 P が負になる領域があるような回路を能動回路と呼ぶ。

付録 B : 実験で使用されるブリッジ回路・バランス回路

B.1 ブリッジ回路

ある導線が2つの並列回路に分岐して再結合している場合に、この並列回路を第3の導線が適当な節を通して「橋渡し」しているような回路を、**ブリッジ回路 (bridge circuit)**と呼ぶ。最も簡単なものは図2.11(a)のようになり、このように四角形と対角線、のような形になる。極めて良く使用されているブリッジ回路は、線形とは言えないが、図2.11(b)のダイオードブリッジである。ちょうど橋渡し部分が出力となっており、正負に振動する交流を一方方向に振動する脈流へと整流する作用がある。大学受験に良く出題される(?)ホイートストンブリッジでは、未知抵抗 R_u に対して電流計 A を流れる電流がゼロとなるように可変抵抗 R_v を調整することで、

$$R_u = R_1 \frac{R_2}{R_v} \quad (\text{B.1})$$

により R_u を得ることができる。しかし、これは物理実験においてはあまり使用されることがない。実際の抵抗測定では、定電流回路に未知抵抗をつないで両端に生じる電圧を測定するか、定電圧回路につないで流れる電流を測定するという単純な方法を取ることがほとんどである。ただし、長時間での小さな変化を取り出すなどの微妙な測定をする場合は、能動系のドリフトなどを打ち消して安定な測定が可能なブリッジ回路、あるいは1つの電源を用いたバランス回路（このような回路も、広い意味でブリッジと呼ぶことがある）が必要となる。このようなバランス回路については、次の副節で述べる。

また、リアクタンス部まで含めてインダクタンスを測定しなければならないような場合にもブリッジ回路が良く使用される。例として図2.12のシェリング (Schering) ブリッジ回路を挙げておこう。ホイートストンブリッジの抵抗をリアクタンスを含むインピーダンスで置換した形をしている。ここでは、右下の辺にあるキャパシタと抵抗の直列回路でこれらの値 (C_x , R_x) が未知だとしてバランスによりこれらを得る。

ブリッジの各辺名 j を図のように、1, 2, 3, x と付け、各辺のインピーダンスを Z_j とする。D に電流が流れない平衡状態では

$$Z_1 Z_x = Z_2 Z_3, \quad Z_x = Z_2 Z_3 Y_1 \quad (\text{B.2})$$

である。ここで、

$$Z_x = R_x + \frac{1}{i\omega C_x}, \quad Z_2 = R_2, \quad Z_3 = \frac{1}{i\omega C_3}, \quad Y_1 = \frac{1}{R_1} + i\omega C_1$$

を上式の代入することで

$$R_x + \frac{1}{i\omega C_x} = R_2 \frac{1}{i\omega C_3} \left(\frac{1}{R_1} + i\omega C_1 \right)$$

となり、実部虚部それぞれの条件から

$$R_x = \frac{R_2 C_1}{C_3}, \quad C_x = \frac{R_1}{R_2} C_3 \quad (\text{B.3})$$

と、 ω によらない結果が得られる。

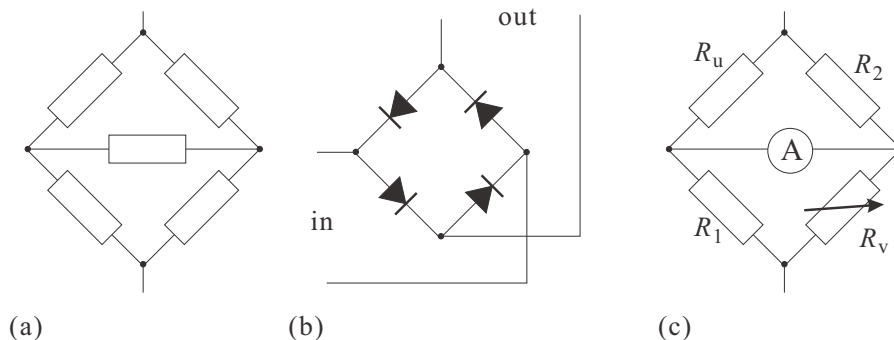


図 2.11 (a) 最も簡単な抵抗ブリッジ. (b) 整流に使用されるダイオードブリッジ. (c) ホイートストンブリッジ.

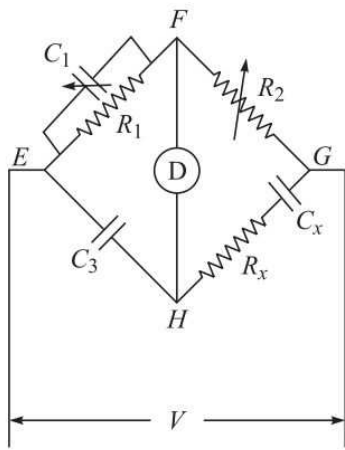


図 2.12 シェリングブリッジ回路.

B.2 バランス回路

「ブリッジ」と呼べるかどうかは微妙だが、インダクタンス結合を用いて交流を差動出力に変化させ、これを直列に加えて差を取ることで基準値からの差分のみを取り出す、バランス回路を2種類紹介する.

図 2.13(a) は、ハーツホーン (Hartshorn) ブリッジと呼ばれる回路で、ここではコイル中に置かれた試料の帯磁率変化によるコイルのインダクタンス変化を取り出すもの. (b) は、原理的にはこれと同じであるが、試料抵抗の微小な変化を標準抵抗出力からの差分として取り出すものである. いずれも、第1回で紹介したコイルをスイッチで切り替える方式の可変インダクタンス (レシオトランス) を用いている.

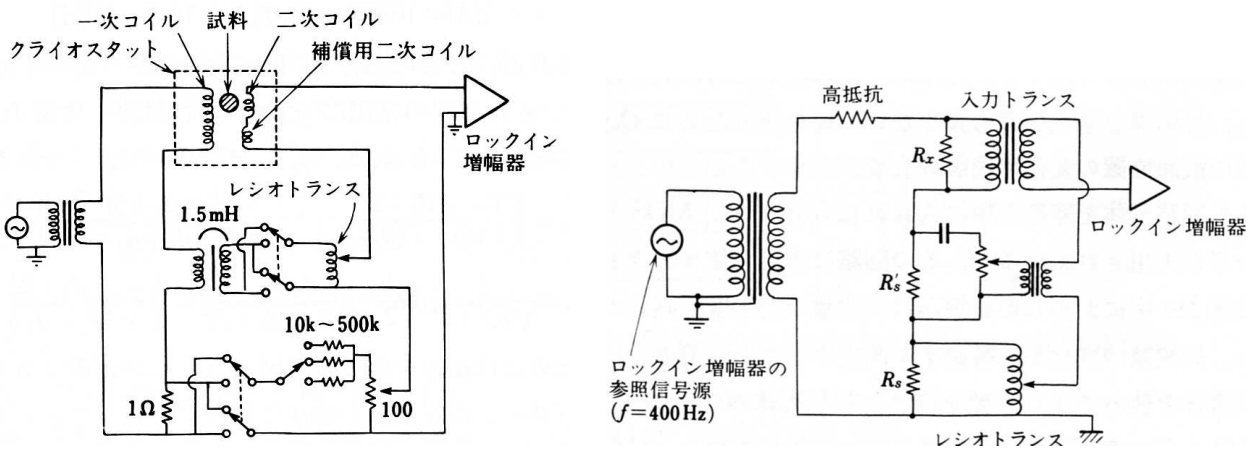


図 2.13 (a) ハーツホーンブリッジ回路. 図はコイル中に置かれた試料の帯磁率を測定する回路. (b) 未知抵抗の微小変化を、既知抵抗から取り出した交流の差分を取ることで検出する回路. いずれも文献 [2] より.

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] 小林俊一, 大塚洋一, 「低温技術 第2版」 (東大出版会, 1987).