
新版

医・生物学系のための
電気・電子回路

医学博士 堀川 宗之 著

コロナ社

新版の序文

初版を上梓してから18年余りが経過した。この間生体医工学の進歩は著しく、新しい知見を取り込んだ医療機器・システムが開発され人類の福祉に貢献している。これと並行して機器の規格変更、新しい回路技術の導入、JISの電気回路図の改訂などが行なわれた結果、現行版には現状にそぐわない点がでてきており、最新の知見に後れをとられないように新たに加筆・修正を行なって内容の充実を図った。

初版は当初から民生機器や工業計測を対象とした電気・電子回路の解説書とは一線を画し、生体医工学や臨床工学などの医・生物学系の読者に軸足をおき、扱う内容や重要度を実用に即して記述した。幸い著者の意図が理解され、多くの方から初版を評価して頂いたことは大変幸甚なことであると同時に責任を感じている。

新版にするにあたって、基本的には初版の章立て、節立てを踏襲したが、なかつぎのような改訂をおもに行なった。

- ① 本文中の電気回路図の部品図記号をすべて新JISに準拠して修正した。
- ② デジタルの心電計や脳波計で採用されているフローティング回路についてやや詳しく解説した。
- ③ 機器の規格変更、例えば出力波形が単相式から2相式に置き換わった除細動器などについて、その回路構成や動作原理を説明した。
- ④ 心電図などの生体情報のモニタリングが普及しているので、情報伝送の基本である「変調と復調」について新規に章を立てて解説した。
- ⑤ 初版で抜けていた用語や記述内容を加筆・修正し、各章を充実させた。

最近、生体に電気や磁気のエネルギーを作用させる治療機器が普及しており、電気や磁気の振る舞いをしっかり理解する必要性に迫られている。それには電気や磁気の基礎となる原理や法則、すなわち電磁気学をひもとく必要がある。そこで、新版の読者に必要と思われる静電気や磁気の基本的性質を、副読本として「電磁気の基礎」の書名で提供することとした(p.1参照)。

副読本を読むことによって電気・電子回路の動作原理も電磁気学で裏打ちされることになり、知識の整理がなされ確実な知識を自分のものにすることができる。副読本は電子媒体の形をとっているため、新版と併せて活用して頂ければ電気工学全般を一貫して習得できるものと確信している。

終わりに、新版執筆の機会を与えてくださった株式会社コロナ社の方々に謝意を表する。

2016年8月

堀川 宗之

初版の序文

生体電気信号は微小で低周波成分に富み、外乱に反応しやすい性質をもっているため、その検出には民生機器や工業計測を対象とする電気・電子回路とは異なった回路技術が使われている。したがって、工学系の学生を対象としたこれまでの電気・電子回路の参考書では扱われる内容や重要度が必ずしも妥当とはいえず、医・生物学系の読者に適した内容の解説書が望まれている。

最近、医療情報や実験データはデジタル処理され、容易にグラフ作成や統計処理がなされる環境にあるが、出力された結果の内容の解釈や意味づけができない学生が増えているように思える。デジタル処理の重要性は論を待たないが、基本的なアナログ回路の必要性も軽視できない。

このような背景から、著者自身が医学を修めた後に電気を学んだ過程で理解に苦しんだ経験を生かし、医・生物学系の学生を対象に生体計測に必要な電気・電子回路について解説した。総花的で、通り一遍の説明にとどまらないよう、また結果のみを羅列するのではなくその導出過程も示し、読者が式の内容をそしゃくできるように配慮した。医・生物学系に多い「電気嫌い」の人達にも理解できるように、図、表を多く活用し、各項の内容と関連の深い生体物理現象や、医療機器に関する事項を「ME ノート」としてまとめ随所に織りこんで味わいを添えた。

浅学非才を省みず読者諸氏に少しでも役立つようにと執筆した。厳密さを欠く記述や不測の誤りもあるかと思われるが、大方のご批判やご指導をいただければ幸いである。

著者の後半生を東海大学開発工学部において、医用生体工学の教育に携われる機会を与えていただいた東海大学名誉教授 沖野 遙先生に心から謝意を表したい。著者自身の回路設計・製作技術の実践的修得は、日本光電工業株式会社に負うところが大きい。同社名誉会長 医学博士 荻野義夫先生はじめ、技術員の方々に感謝申し上げたい。

1997年5月

堀川 宗之

目 次

1 直 流 回 路

1.1 電 流	1
1.2 電位, 電位差 (電圧) と電界	2
1.3 回 路 図	3
1.4 オームの法則	4
ME ノート 1 血液循環系は閉鎖開路	7
1.5 抵抗の直列接続と並列接続	8
1.5.1 直列接続	8
1.5.2 並列接続	9
1.6 電池の起電力と内部抵抗	10
ME ノート 2 細胞膜の電氣的等価回路	11
1.7 電池の接続方法	12
1.8 キルヒホッフの法則	12
1.8.1 キルヒホッフの第一法則	13
1.8.2 キルヒホッフの第二法則	13
1.8.3 キルヒホッフの法則の使い方	13
1.9 電 力	14
ME ノート 3 大人 1 人は 60 W	16
1.10 ホイートストーンブリッジ	17
ME ノート 4 圧力センサとブリッジ回路	18
1.11 分流器と倍率器	19

2 交 流 回 路

2.1 直 流 と 交 流	21
2.2 正弦波交流を表す式	22
2.2.1 振幅, 周波数, 角速度	22
2.2.2 位 相	24
2.3 正弦波交流の平均値と実効値	26
ME ノート 5 交流の診断・治療への応用	29

2.4 受動素子	30
2.4.1 抵抗器	30
2.4.2 コンデンサ	34
ME ノート 6 細胞膜は平行板コンデンサ	37
ME ノート 7 静電エネルギーを利用した除細動器	40
2.4.3 コイル	41
ME ノート 8 電磁血流計	45
ME ノート 9 SQUID 磁束計	47
2.5 R , C , L の交流に対する性質	48
2.5.1 R のみの回路	48
2.5.2 C のみの回路	49
2.5.3 L のみの回路	51
2.5.4 力率	52
2.6 交流のベクトル表示	54
2.6.1 ベクトルの直角座標表示	55
2.6.2 ベクトルの極座標表示	55
2.6.3 正弦波交流の極座標表示	57
2.6.4 複素インピーダンスと $j\omega$ 法	58
ME ノート 10 容量因子と強度因子	61
2.6.5 複素インピーダンスの直列接続と並列接続	62
2.6.6 $j\omega$ 法を用いた交流回路解析	63
2.6.7 $j\omega$ 法の計算例	65
2.6.8 力率の改善法	67
ME ノート 11 接地とシールドの効用	69
2.6.9 コンデンサの誘電損失	71
ME ノート 12 高周波電気療法	72
1. 誘電加温	72
2. 誘導加温	73
3. マイクロ波加温	73

3

電気回路の基礎

3.1 重ね合わせの定理	74
ME ノート 13 細胞内は負電位	75
3.2 テブナンの定理	76
3.3 ノートンの定理	77
3.4 定電圧源と定電流源	78
3.4.1 電圧源	78
3.4.2 電流源	79
3.4.3 電圧源と電流源の相互変換	79
ME ノート 14 定電圧刺激と定電流刺激	80
3.5 インピーダンス整合	81
ME ノート 15 クロナキシーとエネルギーの効率	82

3.6 共振回路	83
3.6.1 直列共振回路	85
3.6.2 並列共振回路	88
ME ノート 16 呼吸インピーダンス	90

4 過 渡 現 象

4.1 CR 回路の充電	92
4.1.1 充電式と電荷保存則	92
4.1.2 過渡応答曲線と時定数	93
4.1.3 応答曲線の定性的説明	95
4.1.4 グラフから時定数を求める方法	95
4.2 CR 回路の放電	96
4.2.1 放電式(1)	96
4.2.2 放電式(2)	98
4.3 時定数の性質	99
4.3.1 過渡応答曲線の接線と時定数の関係	99
4.3.2 時定数と遮断周波数の関係	99
4.3.3 時定数と立上り時間の関係	100
4.3.4 時定数とサグの関係	100
4.4 RL 直列回路	102
4.4.1 充磁式	102
4.4.2 放磁式	103
ME ノート 17 生体情報と時定数	104
4.5 ランプ関数応答と微分/積分回路	105
4.5.1 CR 回路のランプ関数応答	105
4.5.2 微分回路	105
4.5.3 積分回路	107
4.5.4 $j\omega$ 法を用いた微分/積分動作の説明	109
4.5.5 時定数の大小と心電図波形のひずみ	110
ME ノート 18 生体組織の力学特性	113
4.6 方形パルスの過渡応答	115
4.6.1 方形パルス応答波形	115
4.6.2 時定数の大小による方形パルス応答の変化	118
ME ノート 19 心電図の基線は 0V ではない	119

5 ダイオード

5.1 整流作用とスイッチング作用	121
5.2 静特性	122
ME ノート 20 生体とダイオード	123
5.3 動特性	124

5.4 定電圧電源回路..... 127
 5.5 波形の整形..... 129
 5.6 定電圧ダイオード..... 130
 ME ノート 21 心臓弁膜症の電気的アナロジー 132

6 トランジスタ

6.1 半導体とは..... 133
 ME ノート 22 半導体と生体微量元素 134
 6.2 pn 接合..... 135
 6.3 トランジスタの構造と動作原理..... 135
 6.4 増幅作用..... 137
 ME ノート 23 冠循環とベース接地 140
 6.5 スイッチング回路..... 141
 ME ノート 24 心臓刺激装置とカエルの心電図 143
 6.6 電界効果トランジスタ..... 144
 6.7 その他の半導体素子..... 145
 6.7.1 発光ダイオード (LED) 145 6.7.2 フォトダイオードとフォトトランジスタ 145
 6.7.3 サーミスタ, 硫化カドミウム 146 6.7.4 可変容量ダイオード 146
 6.7.5 サイリスタ 146

7 周波数伝達関数

7.1 デシベル..... 149
 7.2 ボード線図..... 150
 7.2.1 CR 微分回路のボード線図 151 7.2.2 CR 積分回路のボード線図 152
 7.2.3 生体用増幅器のボード線図 154
 ME ノート 25 病気の診断と伝達関数 155

8 演算増幅器

8.1 差動増幅器..... 156
 8.2 オペアンプ..... 158

8.3 帰還回路	160		
8.3.1 正帰還増幅回路	160	8.3.2 負帰還増幅回路	161
MEノート 26 生体制御機構と負帰還	163		
8.4 反転増幅器	163		
8.5 非反転増幅器	166		
MEノート 27 インピーダンス変換器としての心臓	167		
8.6 オフセットとスルーレート	169		
8.6.1 オフセットの発生原因	169	8.6.2 スルーレート	170
8.6.3 実用回路例	170		
8.7 差動(演算)増幅器	172		
8.7.1 同相信号除去比	174	8.7.2 信号源インピーダンスと同相信号 除去比	175
8.8 ミラー効果	177		
8.9 微分回路	178		
8.9.1 微分回路のボード線図	178	8.9.2 血圧用微分器の設計	181
8.10 積分回路	183		
8.11 発振回路	185		
8.11.1 LC発振回路	185	8.11.2 水晶発振回路	186
8.12 フローティング回路	187		
8.12.1 デジタル心電計の回路構成とその動作	187	8.12.2 フローティング回路における 同相信号の抑制	190
8.12.3 デジタル脳波計のフローティング回路	191		

9

能動フィルタ

9.1 最大平坦形低域通過フィルタ	193		
9.1.1 2次低域通過フィルタ	194	9.1.2 3次低域通過フィルタ	197
9.2 最大平坦形高域通過フィルタ	198		
9.3 インディシャル応答	200		
MEノート 28 観血式血圧測定法	202		
1. 測定系の伝達特性	202	2. 導管系の特性試験	204
MEノート 29 除細動器の出力	206		
1. 単相性出力波形	206	2. 2相性出力波形	207
9.4 帯域遮断フィルタ	209		

9.4.1	伝達関数とボード線図	209	9.4.2	ノッチフィルタのインディシャル 応答	212
9.5	帯域通過フィルタ	213	9.5.2	帯域通過フィルタのインディシャル 応答	215

10

変調と復調

10.1	変調	217	10.1.2	周波数変調	221
10.1.1	振幅変調	218	10.1.3	位相変調	223
10.2	復調	224	10.2.2	FM 復調	225
10.2.1	AM 復調	224			

11

分布定数回路

11.1	集中定数と分布定数	227
11.2	特性インピーダンス	228
11.3	反射係数	230
11.4	電磁波（電波）の放射と伝搬	232
11.5	電磁波の送受信	234
索 引		237

1.2 電位, 電位差 (電圧) と電界

電流の正体は電荷の移動であったが, それでは電荷の移動はどのように起こるのか? 水が低いほうへ流れるように, 電流も電気の水位の高いほうから低いほうへ流れる。この電気の水位を**電位**と名づける。この電位を生じる力をもった空間を**電界 (電場)**という。

2点間に水位の差があると水圧が生じ水を押し流すと同様に, 2点間に電位の差があると電気 (電荷) の移動が起こり, 電流を生じる原因となる (図1.3)。水位の差, すなわち電位の差がなければ電流は流れない。この2点間の電位の差を**電位差**または**電圧**という。電位差や電圧を記号 V で表し, 単位の記号には [V] (ボルト) を使う。距離 d [m] の2点間の電位差が V [V] であれば, 2点間の電界の強さ E は, $E = V/d$ [V/m] である。電位差 (電圧) は2点間, 前述の電流は1点で定義されることを確認しておこう。なお, 電界と電位の定義はそれぞれ「電磁気の基礎」の1.7節, 1.13節に解説してあるので見ておこう。

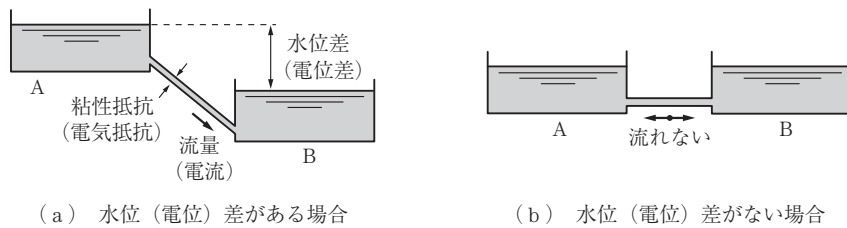


図1.3 2点間の水位 (電位) 差

V と [V] は一見まぎらわしい記号であるが, 一般的に電圧や電流のような変化量を表す記号 (量記号) には斜体 (イタリック体) を用い, 単位の記号には立体の活字を使う約束になっている。

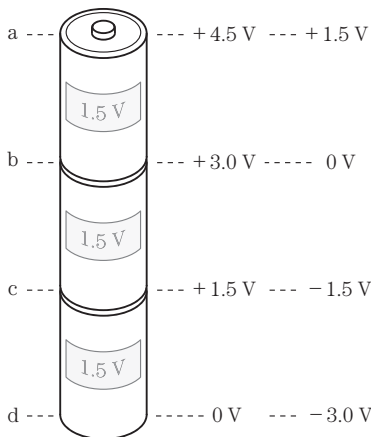


図1.4 基準点の選択による電位 (差) の違い

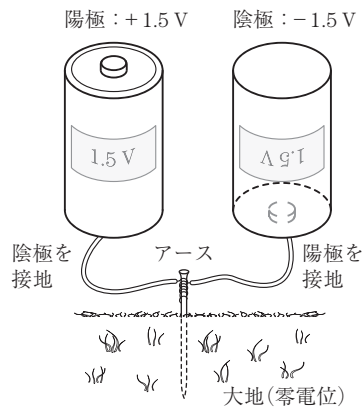


図1.5 基準点の接地

また、単位記号には慣習で〔 〕をつけるが、具体的な数値を表すときは〔 〕をとって、例えば 1.5 ボルト、または 1.5 V と表記するのがふつうである。

乾電池の電圧が 1.5 V といっているのは、陽極と陰極の電位差のことで、陰極を基準にとって電圧を測ると陽極は +1.5 V、陽極を基準にとると陰極は -1.5 V となり基準点のとり方により極性が異なる。基準点より高い電圧には +、低い電圧には - 符号をつける。

図 1.4 のように 3 個の乾電池を重ねた場合、点 a、点 c の電圧は点 d を基準点にとるとそれぞれ +4.5 V、+1.5 V であるが、点 b を基準にすると点 a は +1.5 V、点 c は -1.5 V となる。基準点を図 1.5 のように大地に接続（接地）すると、大地はとてつもなく大きな地球の一部であり、電気をよく通すので電位の絶対的基準点（零電位）が得られる。しかし、実際の回路で絶対的電位（地球との電位差）を問題にすることはまずない。

1.3 回路図

図 1.6(a) の豆電球を点灯する実験回路を、図記号で表すと図(b)のようになる。これを回路図と呼ぶ。乾電池や豆電球のような素子を電気的に接続する線状の導体は導線（リード線）と呼ばれる。導線もいくつかの抵抗をもっているが無視できる程度なので、抵抗は 0 とみなして回路図では実線で示す。導線上（回路図では実線上）はどこでも同じ電位であるが、これは抵抗が 0 なので電圧降下が生じないためである。

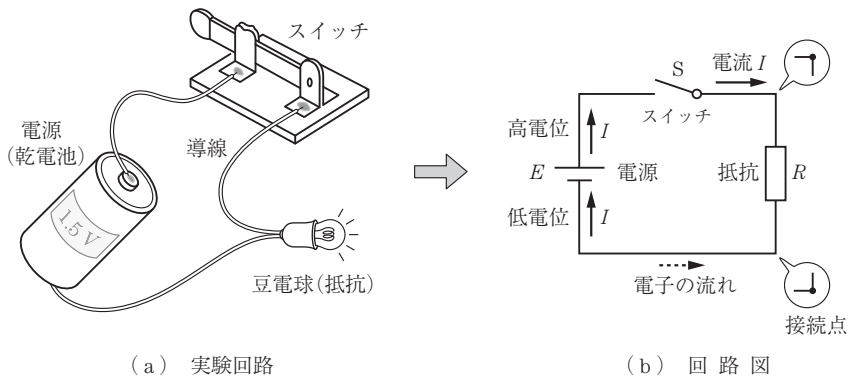


図 1.6 豆電球点灯実験とその回路図

また、結線（接続）されているところはドット（点）をつけて示すが、通常は分岐点以外では省略する。その他の素子の図記号も JIS（日本工業規格：Japanese Industrial Standard）で決められている。徐々に覚えていこう。

豆電球のように電気（エネルギー）を消費するものを**負荷**という。図の負荷は、具体的には豆電球のフィラメント抵抗で、**電気抵抗**と呼ばれ、記号 R で表す。抵抗の単位には $[\Omega]$ （オーム）を用いる。

4 1. 直 流 回 路

豆電球を点灯するにはスイッチSを押して電流を流すが、このように回路に電流を流すことを「回路を閉じる」といい、そのときの回路を閉回路という。また、スイッチを切ることは「回路を開く」という。

図の閉回路において、電流のもとになる正電荷は電位の高い陽極から流れ出し、豆電球を通過して陰極に流れこむ。そして、乾電池の内部では、正電荷は化学エネルギー（二酸化マンガンを亜鉛など）によって電位の低い陰極から電位の高い陽極に持ち上げられ、再び陽極から負荷を通過して移動し電流の閉回路をつくる。このように電池には、ある電位差を維持して電流を流し続ける駆動力が存在する。これを起電力といい、 E （あるいは V ）で表す。また、起電力をもっている電池や発電機などを電源と呼ぶ。

これまで、電流は陽極から正電荷が流れ出て生じると説明してきたが、実際は電池の陰極から電子（負電荷）がリード線に流れ出て、負荷を通過して陽極に戻り電池内を陰極まで運ばれて、再び陰極から流れ出ている。このように電流の向きは実際の電子の移動方向と反対になっている。

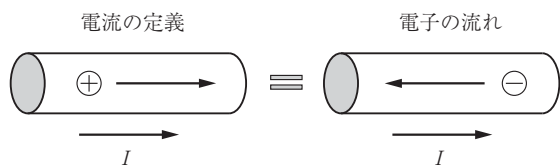


図 1.7 電流の定義と電子の流れ

この矛盾は正電荷の流れる方向を電流の向きと約束したことに始まるが、負電荷が正電荷と逆に移動することは電流の向きとしては同じ結果になるので（図 1.7）、今後も電流は電位の高い点から低い点に向かって正電荷が流れると理解し、電子の実際の動きにいちいち立ち戻って考えないことにする。これで不都合を生じることはない。

回路図で電流を表すには流れる方向に矢印を記入して示す。一方、電圧は測定する2点間を矢印で示し、矢印の根元を基準点に一致させる。これについては電圧降下のところで説明する。

1.4 オームの法則

図 1.6 の実験回路において、豆電球を流れる電流や豆電球の両端の電圧を測定してみよう。

電流を測定するには電流計（アンメータ）を使用する。電流計の図記号には A を用いる。電流計は、測定したい回路に直列に（回路の途中に）挿入する（図 1.8）。電流計には + 端子と - 端子があるので、回路に接続するときは + 端子に電流が流れこみ、- 端子から電流が流れ出るように、あるいは電位の高いほうに + 端子を接続する。

回路を切って、その間に挿入

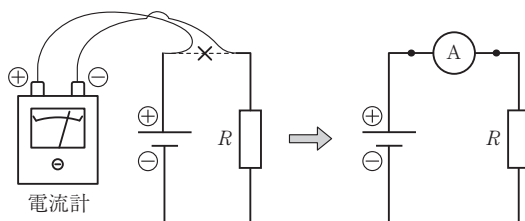


図 1.8 電流計の接続方法

電流は電位の高い点から低い点に流れることを考えれば、「電流の流入点」と「電位の高い点」は同一でどちらで考えてもよいことがわかる。電流計の内部の抵抗（内部抵抗）は小さくつくられ

であり、回路の途中で接続しても影響を受けないようになっている。

電圧の測定には**電圧計**（ボルトメータ）を使う。電圧計の図記号には V を用いる。電圧計は、測定したい2点間に並列に接続する（**図 1.9**）。電圧計の内部抵抗は大きいので、回路につないでも電圧計に流れこむ電流はわずかで回路にほとんど影響を与えない。電圧計を接続するときは、+ 端子は電位の高いほうに、- 端子は電位の低いほうにつなぐ。電流計も電圧計も間違っ

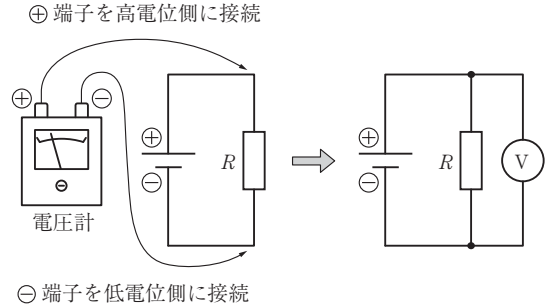


図 1.9 電圧計の接続方法

て、指針が逆に（目盛のないほうに）振れて測定できない。電流計と電圧計の両方の機能を兼ね備えた測定器は**テスタ**と呼ばれる。最近ではデジタル式が普及し、電流値や電圧値を直読できるようになっている。

図 1.6 の電気回路の電圧電流測定法を回路図で示したのが**図 1.10**である。乾電池が1個の場合の測定結果は、 $V = 1.5 \text{ V}$ 、 $I = 1.0 \text{ A}$ であった。つぎに、電池を1個ずつ重ねて接続（直列接続）したときの電圧と電流の値は**表 1.1**のようになった。この結果をグラフにすると**図 1.11**が得られる。

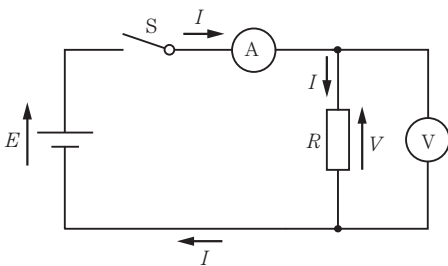


図 1.10 電圧電流測定回路

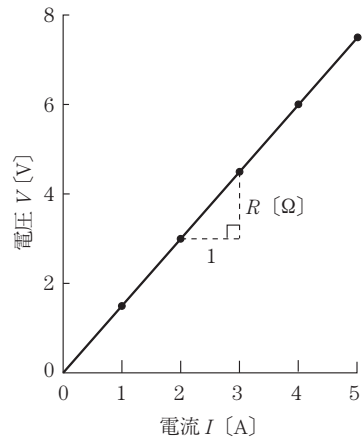


図 1.11 電圧と電流の関係

表 1.1 図 1.10 の回路の測定データ

電池の個数	1	2	3	4	5
電圧 V [V]	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5
電流 I [A]	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0

グラフから、電圧と電流は原点を通る直線の関係にあることがわかるので

$$\text{電圧} = \text{比例定数} \times \text{電流}$$

の関係式が得られる。電圧を一定としたとき、比例定数を大きくすると電流は減少し、この比例定

数は電流を妨げる働きをする。このことから比例定数は**抵抗**と呼ばれ、上式は

$$\text{電圧} = \text{抵抗} \times \text{電流}$$

と書き換えられる。これを**オームの法則** (Ohm's law) という。

電圧、電流の単位をそれぞれ [V], [A] とすると、抵抗の単位は [Ω] となる。オームの法則は記号を使ってつぎのように書ける。

$$V [V] = R [\Omega] \times I [A] \tag{1.1}$$

$$I [A] = \frac{V [V]}{R [\Omega]} \tag{1.2}$$

$$R [\Omega] = \frac{V [V]}{I [A]} \tag{1.3}$$

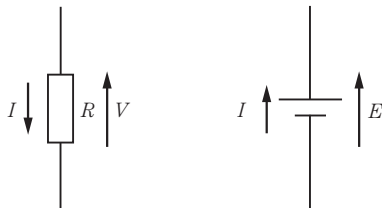
電圧、電流および抵抗の値が大きいときや小さいときは、**表 1.2** のような単位で表す。

表 1.2 V, I, R の基本単位と倍数単位

単位 電気量	M (メガ) $\times 10^6$	k (キロ) $\times 10^3$	基本単位 $\times 1$	m (ミリ) $\times 10^{-3}$	μ (マイクロ) $\times 10^{-6}$	n (ナノ) $\times 10^{-9}$	p (ピコ) $\times 10^{-12}$
電圧 V	MV	kV	V	mV	μV	nV	pV
電流 I	*	kA	A	mA	μA	nA	pA
抵抗 R	M Ω	k Ω	Ω	m Ω	$\mu\Omega$	*	*

* : ふつうは使用しない

抵抗 R に電流 I が流れると、抵抗の両端にオームの法則から $R \times I = V$ の電圧が発生する。電流は電位の低いほうへ流れるので抵抗中でも電位が下がると考えて、 $R \times I$ を**電圧降下**と呼ぶ。電圧降下は矢印の根元を基準とし、矢印の矢を電位の高いほうに向けて表す (図 1.12(a))。したがって、電圧降下の矢印と電流の矢印の向きはたがいに逆になる。



(a) 電圧降下 (b) 起電力

図 1.12 抵抗および電源内の電流と電圧の向き

一方、電源では図(b)のように起電力 (電圧) E の矢印は電位の高い陽極を向き、電流の矢も陰極から陽極に向かうので起電力と電流の矢印の向きは一致する。図 1.10 に見るように、起電力と電圧降下の矢印の向きは一致し、回路内で両者は釣り合う。

オームの法則は流体力学系に類似性が見い出せる。図 1.3 ですすでに学んだように、水位の差は電位差 (電圧) に、流れこむ水の量 (流量) は電流にアナロジー (analogy, 類推) できる。管の太さや長さによって流量が異なるので、管は抵抗に当たる。これらをまとめると

(電気系)	(流体系)
電位差 V	水位差 (圧力)
電 流 I	流 量
抵 抗 R	粘性抵抗

索 引

【あ】

アッテネータ	150
圧力センサ	18,202
アドミタンス	61
アナロジ	202
アノード	121
アンペア	1

【い】

位 相	25,149
位相角	149
位相曲線	151
位相特性	149
1/4 波長モノポールアンテナ	235
イマジナリーショート	164
医用テレメータ	227,235
インディシャル応答	92,200
インバータ	127
インピーダンス角	60
インピーダンス整合	81
インピーダンス変換器	167

【え】

エミッタ	136
エミッタ接地	139
エミッタ電流	136
演算増幅器	156

【お】

オイラーの式	55
オクターブ	152
オシレーション法	91
オフセット	169
オペアンブ	156
オームの法則	6
温熱療法	30

【か】

階段状関数	108
回転ベクトル	22,63
開ループ利得	159,161
回路図	3
回路を閉じる	4
回路を開く	4

可逆性ショック	163
角周波数	22
角速度	22
重ね合わせの定理	74
過制動	201
下側波	220
下側波帯	220
カソード	121
片持ちばり	18
活性状態	142
活性領域	139
カテーテル	202
可動コイル形	19
過渡応答	92
過渡現象	92
過渡状態	92
可変抵抗	31
冠状動脈	140
カンチレバー	18

【き】

帰 還	160
帰還回路	160
帰還増幅回路	160
帰還抵抗	177
帰還率	160
起 点	54
起電力	4,10
逆 相	26
逆相入力端子	158
逆方向	121,135
逆方向抵抗	121
逆方向電圧	121
逆方向電流	121
キャパシタ	34
キャパシタンス	34
給電線	228
共 振	84
共振周波数	85,203
強度因子	61
極興奮の法則	143
極座標表示	55
虚 軸	55
極超短波療法	29
鋸歯状波	22,115

虚 部	55
キルヒホッフの第一法則	13
キルヒホッフの第二法則	13
キルヒホッフの法則	12
金属皮膜抵抗	31
筋ポンプ	123

【く】

矩形波	22
クランプ回路	129
クロナキシー	82
加え合わせ点	160

【け】

計装用増幅器	173
ゲイン	149
ゲイン曲線	151
ゲート	144
減衰器	150
減衰係数	196,201
減衰傾度	153,192
検 波	217
検流計	17

【こ】

高域遮断周波数	154
高域通過フィルタ	101,152,192
高周波電気療法	29
合成インピーダンス	62
合成抵抗	8
合成複素インピーダンス	60
降伏電圧	122
交流増幅器	119
交流電圧	22
交流電流	22
固定(形)コンデンサ	35
固定抵抗	31
固有周波数	85,203
コレクタ	136
コレクタ電流	136
コンダクタンス	7,61
コンデンサ	34
コンバータ	127
コンプライアンス	7

【さ】

最大周波数偏移	222
最大値	23
細胞内電位	11
サグ	100
鎖交磁束数	41
鎖交磁束の連続性	93
サセブタンズ	61
差動演算増幅器	173
差動増幅器	156, 158, 173
差動利得	159, 175
サーミスタ	33
三角波	115
酸素消費量	16

【し】

時間領域表示	99
磁気エネルギー	47
磁気シールド	71
磁気シールドルーム	47
自己インダクタンス	41
仕事率	14
自己誘導	41
実効値	27
実軸	55
実部	55
時定数	93
遮断域	192
遮断周波数	100, 152, 192
遮断状態	141
遮断領域	139
周期	23, 115
修正形微分回路	180
集積回路	145
集中定数回路	227
終点	54
自由電子	133
周波数	24, 115
周波数スペクトル	99
周波数伝達関数	148
周波数特性	149
周波数偏移	222
周波数弁別	225
周波数領域表示	99
受動素子	30
受動的微分回路	178
受動的(的)フィルタ	192
ジュール熱	15, 16
瞬時電力	48
純抵抗	60
順方向	121, 135

順方向電圧	121
順方向電流	121
上限クリップ回路	129
少数キャリア	134
上側波	220
上側波帯	220
商用交流電源	22
商用周波数	24
じょう乱関数	203
枝路	13
真空管	136
進行波	230
信号波	217
真性半導体	133
進相コンデンサ	69
心臓電気刺激装置	143
心臓ペースメーカ	142
心拍出量	140
振幅	23
振幅特性	149
振幅比	148

【す】

水晶振動子	186
スカラ	54
スターリングの法則	141

【せ】

正帰還	160
正弦波	22
整合	81
正相入力端子	158
静電エネルギー	39
静電シールド	70
静電容量	34
制動係数	196
静特性	125, 138
整流作用	121
積分回路	108
接続点	13
絶対値	55
節点	13
セメントモールド抵抗	31
零位法	17
尖鋭度	86
線形回路	75
尖頭値	29
占有周波数帯域幅	220

【そ】

相互インダクタンス	43
相互誘導作用	43

ソース	144
ソリッド抵抗	31

【た】

ダイアフラム	18
帯域遮断フィルタ	192, 209
帯域通過フィルタ	192
帯域幅	192
ダイオード	121
対称方形波	115
対地インピーダンス	70
多数キャリア	134
立上り時間	100
ダッシュボット	113
単安定マルチバイブレータ	143
端子電圧	10
単振動	22
炭素皮膜抵抗	31
短波療法	29

【ち】

中心電極	188
注入	135
超短波療法	29
超伝導量子干渉素子	47
直並列回路	62
直流	21
直流増幅回路	156
直流増幅器	112, 119
直列共振回路	85
直列接続	8
直角座標表示	55

【つ】

通過域	192
ツェナー電圧	131
強さ-時間曲線	82

【て】

低域遮断周波数	154
低域通過フィルタ	153, 192
定格電流	31
定格電力	31
ディケード	95, 152
抵抗	6, 60
——の温度係数	31
抵抗温度計	31
抵抗率	30
低周波電気療法	29
定電圧源	78
定電圧刺激	80
定電圧ダイオード	130

定電流源 79
 定電流刺激 80
 デシベル 149
 テスタ 5
 テブナンの定理 76
 デューティ比 115
 電 圧 2
 電圧計 5
 電圧降下 6
 電圧制御素子 136
 電圧増幅度 138
 電 位 2
 電位差 2
 電 界 2
 電界効果トランジスタ 144
 電荷保存則 93
 電気抵抗 3
 電氣的等価回路 11
 電気メス 30
 電気容量 34
 電 源 4
 電子素子 30
 電磁波 233
 電磁誘導 41
 伝導電流 134
 電 場 2
 電 流 1
 電流計 4
 電流制御素子 136
 電流増幅率 137
 電 力 14
 電力半値周波数 193
 電力量 15

【と】

等価回路 10
 等価電圧源 78
 等価電圧源回路 77
 等価電流源 79
 動作抵抗 121
 同軸ケーブル 227
 透磁率 42
 導 線 3
 同 相 26
 同相信号除去比 175
 同相利得 175
 銅 損 44
 導 体 133
 導電率 31
 動特性 125
 特殊抵抗 31
 特性インピーダンス 229

トラップ回路 90
 トランス 43
 ドリフト 158,169
 トリマコンデンサ 36
 トリマ抵抗 33
 ドレイン 144

【な】

内部インピーダンス 77
 内部抵抗 10

【に】

二乗平方根 27
 入射波 230
 入力オフセット電圧 169
 入力オフセット電流 169
 ニュートラル電極 191

【ね】

熱の仕事当量 15

【の】

能動素子 30,140
 能動的微分回路 178
 能動 (的) フィルタ 192
 のごぎり波 115
 ノッチフィルタ 209
 ノートンの定理 77

【は】

バイアス電圧 136
 バイアス電源 136
 バイポーラトランジスタ 135
 倍率器 20
 バッターワース 194
 バーチャルグラウンド 164
 バーチャルショート 164
 発 振 160,185
 バッファ回路 167
 ハ ム 70
 バリコン 36
 パルス 115
 パルス幅 115
 半固定抵抗 33
 反射係数 230
 反射波 230
 搬送波 217
 反転増幅回路 170
 反転増幅器 163,164
 反転入力端子 158
 半導体 133
 半波長ダイポールアンテナ 234

【ひ】

引出し点 160
 ひずみ抵抗素子 33
 非正弦波交流 22
 非線形回路 75
 皮相電力 54
 非対称方形波 115
 比抵抗 30
 非鉄金属 134
 非反転増幅器 166
 非反転入力端子 158
 微分回路 106,154
 被変調波 217

【ふ】

フィーダ 227
 フォークトモデル 114
 負 荷 3
 不可逆性ショック 163
 負荷線 139
 負帰還 160
 複素インピーダンス 58
 複素数 55
 復 調 217
 不純物半導体 133
 ブースタ 236
 不足制動 201
 浮遊容量 70
 フーリエ解析 117
 ブリッジ回路 17
 ブレークダウン 122
 フローティング方式 188
 プロープ 45
 分布定数回路 227
 分流器 19

【へ】

閉回路 4,13
 平滑回路 126
 平均値 27
 平衡条件式 17
 平衡電位 11
 閉鎖循環系 7
 平 流 21
 閉ループ 13
 閉ループ利得 161
 並列 T 形回路 209
 並列共振回路 88
 並列接続 8
 ベクトル 54
 ベクトルインピーダンス 58

ベース	136	マイクロ波メス	30	ユニポーラトランジスタ	144
ベース接地回路	140	マイクロ波療法	29		
ベース電流	136	マクスウェルモデル	113	【よ】	
変圧器	43	膜抵抗	11	容量因子	61
偏角	55	膜電位	11, 75	容量性リアクタンス	51
変成器	43	マッチング	81	4端子回路網	148
変調	217			【ら】	
変調指数	222	【み】		ラプラス変換	200
変調度	218	右足帰還	189	ランプ関数	105
弁別比	175	右足ドライブ	189		
【ほ】		ミスマッチング	230	【り】	
ホイートストーンブリッジ回路	17	脈流	21	リアクタンス	51, 60
方形波	22	ミラー効果	178	力率	53
放射電磁界	234	ミラー積分回路	185	力率改善	68
放電	49			利得	149
包絡線	218	【む】		利得曲線	151
ほうろう抵抗	31	無効電力	54	利得特性	149
飽和状態	142			リニアIC	156
飽和領域	139	【ゆ】		リプル百分率	127
ボード線図	149	有効電力	54	リミッタ回路	129
ホメオスタシス	163	誘電加温	72	臨界状態	201
ポリウム	33	誘電損失	71	臨界制動	201
ボルテージフォロワ回路	167	誘電損失角	72		
【ま】		誘電率	35	【る】	
マイクロ波	227	誘導加温	73	ループゲイン	162
		誘導性リアクタンス	52		
		誘導電磁界	233		

【A~F】

AM	218
AM復調	224
BEF	192
BPF	192
CdSセル	33
CMRR	175
Faraday cage	71
FET	136
FM復調	224

【H~N】

HPF	101, 192
Hブリッジ回路	207
IC	145
$j\omega$ 法	60
LC発振回路	185
LPF	192
MOS形FET	144
npn形	135
n形半導体	133
n 次の最大平坦形	194

【P~W】

para-T回路	209
PM	223
PM復調	224
pnp形	135
pn接合	135
p形半導体	134
Q値	86
sin波	22
twin-T回路	209
Windkessel理論	104

— 著者略歴 —

1966年 慶應義塾大学医学部卒業
1971年 東京電機大学工学部第二部電子工学科卒業
1978年 医学博士（慶應義塾大学）
1990年 東海大学教授
2009年 東海大学名誉教授

新版 医・生物学系のための電気・電子回路

Electrical and Electronic Circuits for Medical and
Biological Engineering (New Edition)

© Muneyuki Horikawa 1997, 2016

1997年7月15日 初版第1刷発行
2014年3月20日 初版第11刷発行
2016年11月30日 新版第1刷発行

★

検印省略

著者 ほりかわむねゆき 堀川宗之
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00887-6 (高橋) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上の例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします