

基礎 電 氣 回 路

工学博士 内藤 喜之 著

コ ロ ナ 社

序 文

本書“基礎電気回路”は大学低学年電気関連工学科の学生，電気関連工学以外の高学年の学生，高等専門学校を学生を対象として書かれたものである。

“電気回路”はいまや電気系学生のみならず，他の工学科学生の必須科目でもある。それ故現在まで多くの著書が出版され，多くの良書がある。それにもかかわらず本書を書く気になったのは，従来の成書はあまりに多くをもちこんでいて，上記の学生諸君が，何が Essential であるかつかみにくいのではないであろうかと感じたからである。

著者はこれまでに東京工大の電気以外の学生と高等専門学校の学生に10年余り“基礎電気回路”を講義してきた。その経験を基にして，本書の構想をねりあげた。

電気回路は直流の“オームの法則”にはじまり，交流の複雑な回路の“オームの法則”に終わると著者は考えている。そのような考えに基づき，第0章から第9章まで順をおって有機的に組み立てたつもりである。

本書の内容を完全に理解すれば“電気回路”の基礎は十分に習得しえたといえたと信じている。より専門的学科目を学んでゆく上にも不自由は感じないであろう。

“電気回路”の成書の多くは，公式や数式の羅列であると感じられてもいたしかたがない書き方をしているが，本書では電気工学，電気回路学上の歴史的発見，発明に対して，先人の苦勞をしのいでエピソード的な説明を加えることで，内容にうるおいをもたらすと共に，読者諸君がますます“電気関連工学”に興味をおぼえるように心がけた。

また演習問題および詳細な解答をつけ加えることによって学習効果が上がるようにもしている。

本書を書くにあたって、著者が勉強した多くの書の著者に感謝の意を表わします。

またこの本の出版にあたってお世話になった昭晃堂の阿井社長，編集部の佐々木さんにお礼を申しのべます。

昭和51年7月

東京，大岡山にて

内藤喜之

本書を発行していた昭晃堂が2014年6月に解散したことに伴い，この度，コロナ社より継続出版することになりました。昭晃堂にて昭和51年9月の1刷発行から45刷までに至っておりますが，引き続き多くの方にご拝読いただき役に立つならば，出版社としてこの上ない喜びです。

2014年12月

コロナ社

目 次

第 0 章 対象とする波形と回路

0.1 取り扱う時間波形	1
0.2 取り扱う電気回路	4
問 題	7

第 1 章 直 流 回 路

1.1 直流電源，オームの法則	9
1.2 抵抗の接続（直列，並列，直並列）.....	12
1.3 キルヒホッフの法則	14
1.4 重ねの理	16
1.5 直流電力，整合	18
問 題	21

第 2 章 正弦波交流と回路素子

2.1 正弦波交流と複素表示	22
2.2 回路素子の性質	26
2.3 簡単な交流回路の複素数による計算	34
2.4 交 流 電 力	44
問 題	50

第 3 章 正弦波交流回路

3.1 インピーダンス Z ，アドミタンス Y	54
3.2 直列共振回路と並列共振回路	58

3.3	相互誘導回路, 理想トランス	64
3.4	整合回路	68
3.5	ブリッジ回路	70
3.6	フィルタ	72
	問題	75

第4章 一般回路の定理

4.1	重ねの理	79
4.2	鳳-テブナンの定理	80
4.3	ノートンの定理	85
4.4	補償の定理	88
4.5	可逆の理	92
4.6	双対の理	94
4.7	逆回路	99
4.8	定抵抗回路	102
4.9	定電流回路と定電圧回路	104
4.10	Y- Δ 変換	105
	問題	107

第5章 周期波(正弦波以外の)の取り扱い

5.1	非正弦波周期波形とフーリエ級数	110
5.2	電気回路とフーリエ級数	116
	問題	120

第6章 過渡現象

6.1	回路と微分方程式	122
6.2	初期条件	129
6.3	簡単な回路の過渡現象	130

問 題	136
第 7 章 フーリエ変換とラプラス変換	
7.1 フーリエ変換	137
7.2 フーリエ変換と回路	142
7.3 ラプラス変換	144
7.4 ラプラス変換と回路	148
問 題	152
第 8 章 分布定数回路	
8.1 分布定数回路の基本式	154
8.2 基本式の解 (波動).....	159
8.3 反射係数, インピーダンス	164
8.4 定在波分布	171
8.5 スミスチャート	175
8.6 インピーダンス	179
8.7 整合回路	183
問 題	185
第 9 章 回路の表現形式	
9.1 はじめに	187
9.2 4 端子回路	188
9.3 (Z) 行列, (Y) 行列	193
9.4 (F) 行列.....	199
問 題	204
問題解答	206
あとがき, 参考文献.....	223

用語の英語	224
索 引	227

0.1 取り扱う時間波形

電気回路とは、電源を接続すると電荷の流れが生じ、その内部で電磁的な現象（電流が流れたり、電圧が発生したり、電気エネルギーや磁気エネルギーが蓄えられたり、電磁気エネルギーが他の形態のエネルギーに変換されたり）が起こり得るようなものを総称した名称である。加えた電源（これを励振または入力とよぶ）に対して、関心のあるところに発生する電圧や流れる電流、または関心のあるところで消費される電気エネルギー等を応答とか、出力とよんでいる。関心のもち方によって、出力は電圧の場合もあるし、電流や消費されるエネルギーの場合等がある。

電気回路で学ぶことは、励振（入力）に対して、どのような応答（出力）が得られるであろうかということ、一般的な法則として認識すると同時に、個別の代表的な回路について、具体的知識として把握することであろう。また、その入力から出力を得る解析的方法も同時に習得することになる。

入力や出力が時間的にどのように変化するかということが、関心事の一つになるが、それらを入力波形（入力信号波形）、出力波形（出力信号波形）とよぶこともある。

電気回路で取り扱う波形には種々のものがある。

実際問題としては、無限の遠い過去から入力があったとは考えられないから、電源を接続した時刻（ $t=0$ としよう）から入力信号がはじまり、それにと

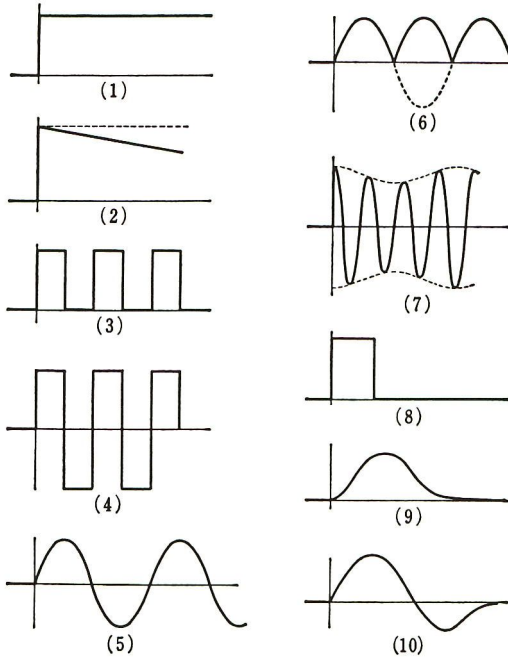


図 0.1

もなつて出力信号も発生することになる。代表的な波形を図 0.1 に示しておこう。また無限の遠い将来まで波形がつづくことも実際上はないであろうから、これらの波形は有限時間 T_L に対して $t > T_L$ では 0 となるであろう。

このような種々の波形を一つ一つ case by case に取り扱うのは、全く能率が悪い。幸いにもフーリエ解析によると、われわれが物理現象として取り扱う波形は図 0.2 に示す $-\infty$ から $+\infty$ までに存在

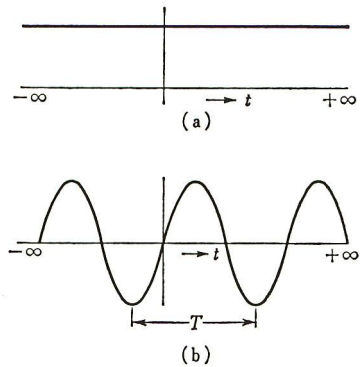


図 0.2

する二つの波形のよせ集めと考えられるという結論になる。(a)は $-\infty < t < \infty$ で

$$f(t) = E_0 \quad (0.1)$$

と表わされる信号波形で、(b)は $-\infty < t < \infty$ で

$$f(t) = E \sin(\omega t + \varphi) \quad (0.2)$$

の形式で表わされる信号波形である。

図 0.1, 0.2 において波形を分類してみると、縦軸すなわち $f(t)$ の値に着目して、 $f(t)$ が定符号の場合に**広義の直流**といい (1, 2, 3, 6, 8, 9), $f(t)$ が符号プラス、マイナスになる場合を**広義の交流**という (4, 5, 7, 10)。

時間軸すなわち横軸に着目し、 $-\infty < t < \infty$ で、有限の T に対して ($T \neq 0$)

$$f(t) = f(t + T) \quad (0.3)$$

の関係があるとき、 $f(t)$ を**周期波**とよび、 T の最小値を周期とよぶ。それ以外の波を**非周期波**とよぶ。非周期波には非常に広い範囲の波形が考えられ、図 0.1 のものはすべてそうである。

図 0.2 の (b) は周期波であり、その周期は

$$(b) \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} \quad (0.4)$$

である。 T の逆数を**周波数**とよぶ。

図 0.1 の (3), (4), (5), (6) で同一波形が $t < 0$ にもあれば周期波である。

周期波 $f_1(t)$ と周期波 $f_2(t)$ との和 $f(t) = f_1(t) + f_2(t)$ は、周期波になる場合と非周期波になる場合とがある。それは、それぞれの周期 T_1, T_2 の比が有理数のときには前者となり、無理数のときは後者となる。たとえば

$$f(t) = E_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + E_2 \sin(2\omega_1 t + \varphi_2) \quad (0.5)$$

は前者で

$$f(t) = E_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + E_2 \sin(\sqrt{2} \omega_1 t + \varphi_2) \quad (0.6)$$

は後者である。

つぎに $-\infty < t < \infty$ の中のある有限な時間間隔のみ値をもち他では 0 とな

る波形を弧立波とよぶ。現実に関われわれが扱う波形は厳密な意味では弧立波である。

このように波形の分類ができるのであるが、Fourier 解析の結果からは図 0.2 に示す (a), (b) の合成で、他の波形を表わすことができるので、電気回路で取り扱うべき波形としては、まずこの 2 種に限定してもよいであろう。これらの波形の入力に対する応答を学んだあとに、一般的波形入力に対する応答を学ぶことにする。

狭い意味では、図 0.2 の (a) を直流 (Direct Current), (b) を交流 (Alternating Current) とよぶことにしている。

0.2 取り扱う電気回路

次にこの本の中で考察対象とする電気回路について説明を加えておく。抽象的に電気回路を図 0.3 のように示しておこう。

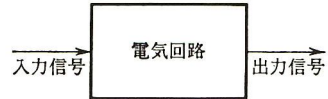


図 0.3

(1) 線形回路

入力信号がそれぞれ $f_1(t)$, $f_2(t)$ のときの出力信号が $g_1(t)$, $g_2(t)$ であるとしよう。そのとき、入力信号 $f(t)$ として

$$f(t) = a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) \quad (0.7)$$

a_1, a_2 を任意定数

と設定したとき、出力信号 $g(t)$ が

$$g(t) = a_1 g_1(t) + a_2 g_2(t) \quad (0.8)$$

となる回路のことを線形回路とよぶ。すなわち、ひらたくいうと入力が 2 倍、3 倍となると出力も 2 倍、3 倍となるような回路のことを線形回路とよんでいる。

この性質がない回路のことを非線形回路という。たとえば、図 0.4 に示すような電圧、電流特性をもつダイオードは非線形回路の一つである。任意に設定

した電圧 v_0 (このときの電流 i_0) の2倍の電圧 $v_1=2v_0$ のときの電流 i_1 は $2i_0$ とは等しくない。

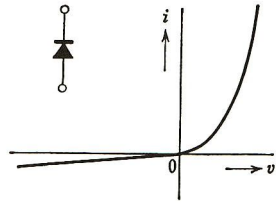


図 0.4

(2) 時不変回路

入力 $f(t)$ に対する出力を $g(t)$ とするとき、

任意の時間 τ だけ入力を遅らせた入力 $f(t-\tau)$ の出力が $g(t-\tau)$ である回路を**時不変回路**という。

この性質をもたない回路を**時変回路**という。図 0.5 に図を示しておこう。

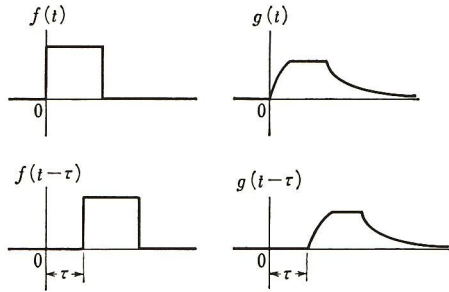


図 0.5

これは回路を構成している素子の電気的特性が時刻と共に変化す

るかどうかにかかわるもので、素子値が時不変であれば回路も時不変で、時変であれば回路は時変回路となる。

(3) 受動回路

入力信号がもたらすエネルギー P_i と出力信号がもっているエネルギー P_o を比較して

$$P_i < P_o \quad (0.9)$$

となることがない回路を**受動回路**という。

式 (0.9) が成り立つ回路を**能動回路**とよぶ。

この本で取り扱う電気回路は、線形、時不変、受動回路である。

実際の電気回路が、厳密な意味で線形、時不変であるかということ、問題があるであろう。

簡単な話が、抵抗器に電圧をかけ電流を流すと、熱が発生して、抵抗値が時時刻々変化するであろう。とすると線形性も時不変性も満足されなくなるであ

索引

(五十音順)

ア行

Admit	55
アドミタンス	30, 54
アドミタンス行列	191
Impede	55
位相	22
位相速度	161
位相定数	163
一様な分布定数回路	159
1対1対応	26, 55
一般解	122
因果律	6
インダクタ	27
インダクタの電気特性	29
インダクタンス	27
インダクティブ	181
インパルス	141
インピーダンス	30, 54, 164, 179
インピーダンス行列	191
インピーダンス変換器	66
ウェスティングハウス	23
<i>F</i> 行列	191
<i>m</i> 重根	128
エジソン	23
エルステッド	97
オイラーの公式	25
応答	1

オームの法則 9

カ行

階段関数	141
開放	175, 181
開放電圧	10, 81
可逆(相反)定理	93, 204
可逆の理	92
角周波数	22
重ねの理	16, 57, 79, 84, 118
過渡解	123, 126
過渡現象	122
規格化インピーダンス	176
基本波	115
逆回路	99
逆起電力	10
キャパシタ	27
キャパシタの電気特性	28
キャパシタンス	27
キャパシティブ	181
共振角周波数	60
共振時のインピーダンス	59
キルヒホッフの法則	14, 88
クーロン	98
減衰定数	163
検流計	70
コイル	27
高域通過フィルタ	74, 104

広義の交流	3
広義の直流	3
高級類推	98
高調波	115
交流	4
交流電力	44
交流理論	127
固有抵抗	10
固有電力	19
孤立波	4
コンダクタンス	54
コンデンサ	27

サ行

サセプタンス	54
3相交流電力送電	105
散乱行列	204
実効値	46
実数係数線形微分方程式	36
時定数	132
時不変回路	5
時変回路	5
遮断周波数	74
周期	3, 22
周期波	3
縦続接続	200
集中定数回路	6
周波数	3, 22
周波数スペクトラム	121
周波数帯域幅	61
周波数特性	57
シュタインメツ	24
出力	1
出力信号波形	1
出力波形	1
受動回路	5
瞬時電力	47
初位相	22
常微分方程式	7
初期条件	123, 129
振幅	22
振幅密度	139
Y (スター) 結線	105
Y- Δ 変換	105
Y- Δ の変換公式	107
数学的抵抗	11
数学的電圧源	11
数学的電源	11
数学的電流源	11
スペクトラム	139
スミス	175
スミスチャート	169
正弦波交流	22
正弦波交流の複素表現	24
整合回路	68, 69, 183, 184
整合負荷	19, 170
斉次	123
線形回路	4, 57
選択度	61
選択性	60
双曲線関数	167
相互誘導現象	64
双対	95
双対な回路	95
双対の関係	96
双対の理	94

タ行

帯域阻止フィルタ	74
帯域通過フィルタ	74
体系化	6
代数方程式	39
短絡	175
短絡電流	87
超高压電力伝送	68
直並列接続	13
直流	4
直流電源	9
直列	12
直列共振回路	58
直列接続	12, 196
直列抵抗	158
直列分布インピーダンス	158
T形移相器	78
Δ (デルタ) 結線	105
Δ -Yの変換公式	106
低域通過形フィルタ	74
低域通過フィルタ	104
低級類推	98
定係数線形微分方程式	122
抵抗	9, 27
定在波比	173
定在波分布	171, 173
定常解	123, 126
定抵抗回路	102
定電圧回路	104
定電流回路	104
デルタ関数	141
電圧降下	11

電気回路	1
電磁誘導作用	97
伝送回路	74
伝達行列	204
伝搬定数	163
電力	18
等価電圧源の定理	83
等価電流源	87
同軸線	156
特殊解	123
特性インピーダンス	163
特性抵抗	170
特性方程式	128

ナ行

内部抵抗	10
2重根	128
入射波	164
ニュートンの万有引力の法則	98
入力	1
入力信号波形	1
入力波形	1
熱電対	9
能動回路	5
ノートの定理	85, 87

ハ行

π 形移相器	78
波長	163
波動	159
反射係数	164, 165

反射波	164
非可逆素子	204
非周期波	3
非正弦波周期波	110
非斉次	123
非線形回路	4
皮相電力	49
微分方程式	39, 122
ファラデー	23, 97
フィルタ	72
フーリエ解析	2
フーリエ逆変換	139
フーリエ級数	111
フーリエ級数展開	112
フーリエ係数	112
フーリエ変換	137, 139
フェザー	56
複素数	55
複素正弦波交流	26
複素電力	50
ブリッジ回路	70
分波回路	104
分布直列インダクタンス	156
分布定数回路	7, 154
分布定数回路の基本式	158
分布並列キャパクタンス	156
平均電力	45, 119
平衡条件式	71
平行2線	156
並列	13
並列共振回路	58
並列コンダクタンス	158

並列接続	13, 196
並列T回路	197
並列分布アドミタンス	158
ヘルツ	23
偏微分方程式	7
帆足-ミルマンの定理	109
鳳-テブナンの定理	80
補償の定理	88

マ行

Maximally Flat	74
マックスウエル	23
マルコニー	62
無効電力	49
無損失分布定数回路	160
無反射負荷	170

ヤ行

有効電力	49
有能電力	19
余関数	123
4端子回路	188
$\frac{1}{4}$ 波長整合回路	185

ラ行

ラプラス逆変換	145
ラプラス変換	137, 144, 145
ラプラス変換の線形性	147
離散の変数	138
理想化	6
理想トランス	66, 184

理想変圧器.....	66	零位法.....	72
類推.....	97	励振.....	1
類推関係.....	98	レッヘル線.....	156
		連続変数.....	138

— 著者略歴 —

1959年 東京工業大学理工学部電気課程卒業
1980年 東京工業大学教授(工学部)
1997年 東京工業大学名誉教授
1997年 東京工業高等専門学校長
1997年 東京工業大学長
2002年 大分大学長
2003年 大分大学名誉教授
2011年 逝去

基礎 電気回路

Fundamentals of electric circuit

© Yukimi Naito 2015

2015年 2月25日 初版第1刷発行
2018年 3月30日 初版第3刷発行

★

検印省略

著者 内 藤 喜 之
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 有限会社鈴木印刷所

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 978-4-339-00873-9 C3054 Printed in Japan (壮光舎印刷, グリーン) (森岡)



JCCOPY < 出版者著作権管理機構 委託出版物 >

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, e-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。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いません。落丁・乱丁はお取替えいたします。