

まえがき

電気回路理論，特に交流回路理論は電気電子工学の根幹をなすものであり，電気電子工学を学ぶ学生にとっては基本中の基本である。この科目については，どこの大学でも力を注いでいる。

電気回路理論の教科書はすでに数多く出版されており，名著といわれているものも多い。しかし，それらは必ずしも現在の学生が理解しやすいものではなく，またシラバス（syllabus）に沿っていないことも多い。現在の電気電子系学科の学生が学びやすく，教員が教えやすい教科書を作ろうと，筆を執ったしだいである。

本書は高校程度の解析学の習得を前提として，基本に重点を置きながら基礎的事項から学部レベルで必要と思われる事項まで丁寧に説明している。大学，高専の電気電子系学科，あるいは章を選択すれば電気電子系学科以外の学生にとっても，学びやすい内容となっている。

なお，本書は，1～4章，11章を清水が，5～7章を村本が，8，13章を中條が，9，12章を伊藤が，10章を飯岡が分担して執筆した。

本書が，学生たちのより良い理解の一助になれば幸いである。

2012年1月

著者

目 次

1. 回路の基礎

1.1 オームの法則	1
1.2 直 流 回 路	3
1.3 キルヒホッフの法則	6
演 習 問 題	8

2. 正弦波交流と回路素子

2.1 正 弦 波 交 流	9
2.2 正弦波交流の表し方	10
2.3 平均値と実効値	13
2.4 回路素子とその性質	16
演 習 問 題	23

3. 記号法とインピーダンス

3.1 微分方程式を使った回路計算	24
3.2 記 号 法	27
3.3 インピーダンスとアドミタンス	36
演 習 問 題	42

4. 電力と力率

4.1 瞬時電力とその平均	44
4.2 電力と力率	49

4.3 複素電力52
4.4 力率の改善55
演習問題60

5. 回路方程式

5.1 キルヒホッフの法則による回路網の解き方62
5.2 クラメールの方法64
5.3 回路網の解析68
演習問題74

6. 回路と諸定理

6.1 重ね合わせの理76
6.2 テブナンの定理79
6.3 ノートンの定理82
6.4 帆足-ミルマンの定理84
6.5 補償の定理85
6.6 相反の定理87
6.7 ブリッジ回路88
6.8 最大電力供給の定理90
6.9 Δ (三角) 結線と Y (星形) 結線の等価変換92
演習問題95

7. 相互インダクタンス

7.1 自己インダクタンスと相互インダクタンス97
7.2 二つのコイルの直列接続99
7.3 相互誘導結合100
演習問題108

8. ひずみ波交流

8.1 ひずみ波交流の定義	110
8.2 ひずみ波交流の電力	112
8.3 ひずみ波交流の波形率, 波高率, ひずみ率	115
8.4 ひずみ波交流のフーリエ級数展開	116
8.5 特殊波形のフーリエ級数の簡易展開	120
演習問題	127

9. 過渡現象

9.1 定常状態と過渡状態	129
9.2 RL 直列直流回路	130
9.3 RC 直列直流回路 (充電)	137
9.4 RC 直列直流回路 (放電)	139
9.5 RC 直列方形波パルス回路	141
9.6 RC 直列交流回路	144
9.7 LC 直列直流回路	147
9.8 RLC 直列直流回路	149
演習問題	153

10. 三相交流

10.1 対称三相交流	155
10.2 非対称三相交流	169
10.3 二電力計法による三相電力の計測	175
10.4 回転磁界	177
演習問題	181

11. 一端子対回路

11.1 一端子対回路	185
11.2 一端子対回路の周波数特性と共振現象	186
11.3 リアクタンス一端子対回路	191
11.4 リアクタンス一端子対回路の合成	197
演習問題	200

12. 二端子対回路

12.1 二端子対回路	202
12.2 アドミタンス行列 (Y 行列)	203
12.3 インピーダンス行列 (Z 行列)	204
12.4 ハイブリッド行列, 並直列行列	205
12.5 四端子行列 (F 行列, 縦続行列)	206
12.6 Y, Z, H, G, F パラメータ間の変換	208
12.7 二端子対回路の縦続接続	209
12.8 二端子対回路の並列接続, 直列接続, 直並列接続, 並直列接続	212
演習問題	216

13. 分布定数回路

13.1 基礎方程式	217
13.2 インピーダンス	222
13.3 反射係数と電圧定在波比	224
13.4 分布定数回路の整合条件	226
13.5 スミスチャートの原理と応用	227
演習問題	230

演習問題解答	232
--------------	-----

索引	244
----------	-----

1.

回路の基礎

本章では、電気回路を学ぶ基礎であるオームの法則と、最も基本的な回路として直流回路について理解する。さらに、キルヒホッフの法則についても学ぶ。多くの部分はすでに高校までに学習している事項であるが、今後の基本となるのでよく理解しておいてほしい。

1.1 オームの法則

金属などでできた導体を流れる電流は、その導体の両端の電位差に比例する。このことを**オームの法則** (Ohm's law) という。オームの法則の簡単な例として、**図 1.1 (a)** に示すように豆電球を乾電池に接続することを考える。豆電球の両端の電位差 V [V] (**ボルト**) と豆電球を流れる電流 I [A] (**アンペア**) は比例し、その比例定数を R とすると

$$V = R \cdot I^\dagger \quad (1.1)$$

と表される。ここで、 R を**電気抵抗**または単に**抵抗** (resistance) と呼び、単位は $[\Omega]$ (**オーム**, ohm) である。これを回路図で示したものが、**図 (b)** である。

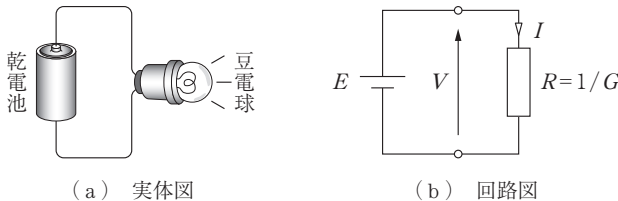


図 1.1 豆電球と乾電池の接続回路

† 式中の \cdot は、掛算を表す。これを省略して例えば RI のように表すことが多いので、本書においても 1.2 節以降においては \cdot を省略する。

2 1. 回路の基礎

式 (1.1) はまた

$$I = \frac{1}{R} \cdot V = G \cdot V \quad (1.2)$$

とも書ける。ここで、 G は抵抗の逆数 ($G=1/R$) で **コンダクタンス** (conductance) と呼ばれる[†]。コンダクタンスの単位は **ジーメンス** (siemens) [S] である。ジーメンスは大文字の S であり、小文字の s は秒である。紛らわしいので気をつけよう。当然のことであるが、[S] = [Ω^{-1}] である。

さて、導体の両端に電位の差 (**電位差**) を発生させ電流を流す働きのことを **起電力** (electromotive force) という。乾電池は起電力を持っているといえる。乾電池のように起電力を持つものを **電源** と呼ぶ。図 (b) では乾電池の起電力 E と豆電球の両端の電位差 V は等しい。起電力は電圧や電位差と同じボルト [V] の単位を持つ。

ところで、オームの法則はいつでもどんなものに対しても成り立つ法則ではない。電圧を増加させると電流が減少するような物質もある。図 1.1 の簡単な例においても、豆電球を乾電池に接続した直後は、じつは電流の値は変化し一定ではない。これは、電球のフィラメントの温度が上昇し、それに伴って抵抗値も上昇するためである。この場合、 V 、 I 、 R をそれぞれ時間とともに変化する量と考えれば、各時刻においてオームの法則が成り立つ。しかし、電流が変化する時間はきわめて短い ($\ll 1s$) ので、通常は豆電球を流れる電流は一定と考えてよい。式 (1.1) で用いた抵抗 R はいつでも一定の値を持つとした理想化した抵抗である。起電力や電圧 V についても同様なことがいえる。実際の乾電池は、何時間も豆電球を接続していれば起電力、したがって電圧は低下する。しかし、回路の電流を測定する数分程度の間は一定としてよいので、式 (1.1) が成り立つ。つまり、式 (1.1) では電圧 V もいつでも一定の値を持つ理想化したものである。

例題 1.1 1.5V の乾電池に豆電球を接続したら、0.5A の電流が流れた。乾電池が消耗して起電力が 1.2V になったとき、何 A 流れるか答えなさい。豆電球の抵抗

[†] conduct は導くといった意味であり、コンダクタンスは電流の導きやすさの指標である。

値は不変とする。

解 電流は電圧に比例するので、 $0.5 \times 1.2 / 1.5 = 0.4 \text{ A}$ である。豆電球の抵抗値は $1.5 \text{ V} / 0.5 \text{ A} = 3 \Omega$ で、コンダクタンスは $1/3 = 0.33 \text{ S}$ である。

1.2 直 流 回 路

電圧や電流の値がいつでも一定である回路を**直流回路**と呼ぶ。直流の英語表記が direct current であるので **DC 回路**ということも多い。これに対して電圧や電流の大きさと方向が時間とともに周期的に変化する回路を**交流回路**と呼ぶ。交流の英語表記が alternating current であるので **AC 回路**ともいう。交流回路については2章以降で学ぶ。

1.2.1 直 列 回 路

二つの抵抗 R_1 と R_2 を図 1.2 に示すように直列に乾電池（直流電源）に接続した回路（**直列回路**）を考えてみよう。

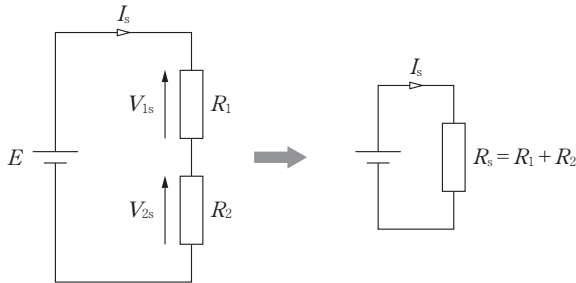


図 1.2 直列回路

R_1 の両端の電位差を V_{1s} 、 R_2 の両端の電位差を V_{2s} とすると、 V_{1s} と V_{2s} の和が直流電源の発生する電圧（起電力 E ）に等しいはずである。また、 V_{1s} と V_{2s} は R_1 、 R_2 と電流 I_s を用いて、 $V_{1s} = R_1 I_s$ および $V_{2s} = R_2 I_s$ と表されるので、式 (1.3) が成り立つ。

$$E = V_{1s} + V_{2s} = R_1 I_s + R_2 I_s = (R_1 + R_2) I_s = R_s I_s \quad (1.3)$$

全体の抵抗は R_s となる。このとき電源から見ると、回路には大きさが $R_s = (R_1 + R_2)$ である一つの抵抗 R_s が接続され、それを電流 I_s が流れているとみな

すこともできる。

1.2.2 並列回路

つぎに、同じ抵抗 R_1 と R_2 を図 1.3 に示すように並列に直流電源に接続した回路（並列回路）を考えてみよう。

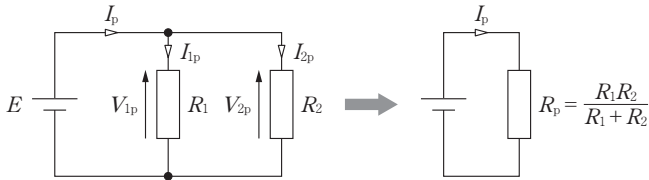


図 1.3 並列回路

R_1 と R_2 の両端の電位差をそれぞれ V_{1p} , V_{2p} とすると、 V_{1p} と V_{2p} は等しく、また直流電源の発生する電圧（起電力 E ）とも等しいはずである。ここで、 R_1 を流れる電流を I_{1p} , R_2 を流れる電流を I_{2p} とすると、 $V_{1p} = R_1 I_{1p}$, $V_{2p} = R_2 I_{2p}$ と表されるので、次式が成り立つ。

$$E = V_{1p} = R_1 I_{1p} = V_{2p} = R_2 I_{2p}$$

これから I_{1p} と I_{2p} は

$$I_{1p} = \frac{E}{R_1} = E G_1$$

$$I_{2p} = \frac{E}{R_2} = E G_2$$

と求まる。ここで、 G_1 , G_2 は抵抗 R_1 , R_2 のコンダクタンスである。直流電源を流れる電流 I_p は $I_p = I_{1p} + I_{2p}$ となるので、式 (1.4), (1.5) が導かれる。

$$I_p = I_{1p} + I_{2p} = E G_1 + E G_2 = E(G_1 + G_2) = E G_p \quad (1.4)$$

$$E = \frac{I_p}{G_p} = I_p R_p \quad (1.5)$$

式 (1.4), (1.5) は、この回路の全体のコンダクタンス G_p と抵抗 R_p が

$$G_p = G_1 + G_2 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$R_p = \frac{1}{G_p} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

となることを示している。

例題 1.2 三つの抵抗 R_1, R_2, R_3 が直列に接続された回路 (図 1.4 (a)) および並列に接続された回路 (図 (b)) について, それぞれの抵抗を流れる電流 I_1, I_2, I_3 , およびその両端の電位差 V_1, V_2, V_3 を求めなさい。また, 全体の抵抗 R_T および全体のコンダクタンス G_T を求めなさい。

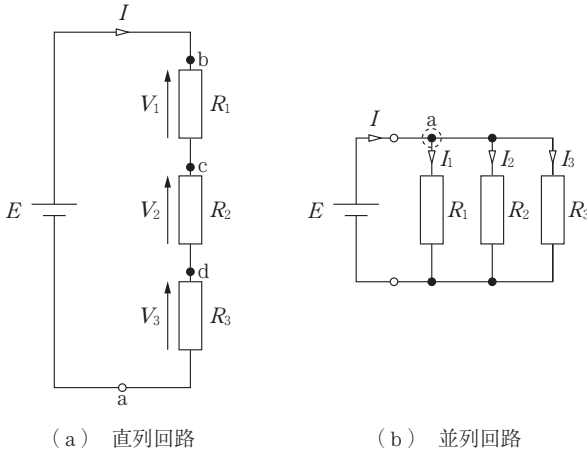


図 1.4 三つの抵抗の接続

解 図 1.4 (a) においては, 電源を流れる電流がそのまま各抵抗を流れるので $I = I_1 = I_2 = I_3$ である。したがって, それらの両端の電位差 V_1, V_2, V_3 は

$$V_1 = I_1 R_1 = IR_1, \quad V_2 = I_2 R_2 = IR_2, \quad V_3 = I_3 R_3 = IR_3$$

である。 V_1, V_2, V_3 の和が電源の起電力 E に等しいので

$$E = V_1 + V_2 + V_3 = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3) = IR_T$$

となる。したがって, $R_T = R_1 + R_2 + R_3, G_T = 1/(R_1 + R_2 + R_3)$ である。

図 (b) においては, V_1, V_2, V_3 が E に等しい。 $E = V_1 = V_2 = V_3$ である。各抵抗の電流は

$$I_1 = \frac{E}{R_1} = EG_1, \quad I_2 = \frac{E}{R_2} = EG_2, \quad I_3 = \frac{E}{R_3} = EG_3$$

と求まる。電源を流れる電流 I は I_1, I_2, I_3 の和に等しいので

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = EG_1 + EG_2 + EG_3 = E(G_1 + G_2 + G_3)$$

よって、全体の G_T , R_T はつぎのように求まる。

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$R_T = \frac{1}{G_T} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}$$

このように、直列回路では電流が共通なため抵抗を、並列回路では電圧が共通なためコンダクタンスを用いるとわかりやすい。

1.3 キルヒホッフの法則

図 1.2 の直列回路では、抵抗 R_1 と R_2 を流れる電流は同じであり、またそれらの両端の電位差 V_{1s} と V_{2s} の和が起電力 E に等しいとしている。図 1.3 の並列回路では、抵抗 R_1 と R_2 の両端の電位差は E に等しく、また電源から流れ出した電流は抵抗 R_1 と R_2 に流れる電流の和であるとしている。これらのことを自明のこととして、式 (1.3) ~ (1.5) を導いている。

18 世紀のドイツの物理学者キルヒホッフ (G.R.Kirchhoff) は、これらの二つのことをきちんとした法則の形にまとめた。これが**キルヒホッフの法則** (Kirchhoff's law) である。

① **電流則 (第 1 法則)** 回路中の任意の一つの接合点に流入する電流の代数和は 0 であり、式 (1.6) で表される。

$$\sum_i I_i = 0 \quad (1.6)$$

② **電圧則 (第 2 法則)** 回路中の任意の一つのループ (閉回路) において、各抵抗の両端の電位差と電源電圧の代数和は 0 であり

$$\sum_i V_i = 0 \quad (1.7)$$

で表される。キルヒホッフの法則により普遍的な解釈を加えれば、電流則は電流が連続であること、すなわち電流が泉のように湧き出す点も、ブラックホールのように吸い込まれる点もないことを示している。また、電圧則は、電位が一意に決まり、2 点間の電位差は経路によらないことを示している。

例題 1.3 図 1.4 (a) の回路で電圧則が成り立つことを確かめなさい。また、図 (b) の回路で電流則が成り立つことを確かめなさい。

索 引

	<p>回路網 62 カウエル形回路 198 可逆の定理 87 角周波数 10 重ね合わせの理 76 過制動 152 過渡現象 129 過渡状態 129 環状結線 92</p>	
【あ】		【こ】
アドミタンス 39		高調波 110
アドミタンス行列 203		交 流 9
アドミタンスパラメータ 203		交流回路 3
網目法 68		固有角周波数 149, 150
アンペア 1		コンダクタンス 2, 39
【い】		【さ】
位 相 10		最大値 10
位相角 10		最大電力供給の定理 90
位相速度 220		サセプタンス 39
一端子対回路 185	【き】	差動的 99
インダクタ 19	奇関数 120	三角結線 92, 159
インダクタンス 18	記号法 27	三相交流 155
インダクタンス素子 19	記号法表示 32	
インピーダンス 32, 36, 222	起電力 2	
インピーダンス行列 204	基本波 110	
インピーダンス整合 91, 227	逆回路 196	【し】
インピーダンスパラメータ 204	逆起電力 18	自己インダクタンス 97
	キャパシタ 20	四端子行列 206
	キャパシタンス 19	四端子定数 207
	キャパシタンス素子 20	四端子パラメータ 207
	共振の Q 188	実効値 13
	極 192	時定数 133
【え】	キルヒホッフの法則 6	ジーマンス 2
枝 62		周 期 10
	【く】	縦続行列 206
【お】	偶関数 120	集中定数回路 217
オイラーの式 28	駆動点 185, 204	周波数 10
遅れ素子 37	駆動点アドミタンス 185	周波数特性 191
遅れ力率 50	駆動点インピーダンス 185	瞬時値 10
オーム 1	クラメルの方法 64	瞬時電圧 10
——の法則 1	クーロン 19	商用周波数 12
		枝 路 62
【か】	【け】	進相コンデンサ 56
回転磁界 177, 180	結合係数 101	振 幅 10
開放駆動点アドミタンス 206	ケラー・フォスター 109	
開放駆動点インピーダンス 205	ブリッジ 109	【す】
開放電圧利得 206	減衰振動 152	進み素子 38
開放伝達アドミタンス 208	減衰定数 150	進み力率 50
開放伝達インピーダンス 205		スミスチャート 227, 228
回路合成 197		

【せ】

静電容量 19
 制動比 150
 正負対称波 122
 積分回路 143
 接続点 62
 接続点法 68
 節 点 62
 節点法 68
 節点方程式 72
 尖鋭度 189
 線間電圧 159
 線形受動素子 16
 線電流 159

【そ】

相互インダクタンス 98
 相互誘導結合 100
 相電圧 159
 相反の定理 87
 素 子 16

【た】

第 1 法則 6, 62
 第 n 高調波 112
 対称三相交流回路 158
 対称波 122
 対称負荷 160
 対数減衰率 152
 第 2 法則 6, 62
 多相交流 155
 端子電圧 17
 単振動の合成 26
 短絡駆動点アドミタンス 204
 短絡駆動点インピーダンス 206
 短絡伝達アドミタンス 204
 短絡伝達インピーダンス 208
 短絡電流の伝達比 208
 短絡電流利得 206

【ち】

中性点 158
 直並列行列 205
 直流回路 3
 直列回路 3
 直列共振 187
 直列接続 40

【て】

低域通過 RC 回路 143
 抵 抗 1, 16
 定在波比 225
 定常状態 129
 定抵抗回路 196
 テブナンの定理 79
 電圧拡大率 188
 電圧帰還率 206
 電圧源 21
 電圧降下 17
 電圧則 6, 62
 電圧定在波比 225
 電圧の伝達比 208
 電位差 2
 電気抵抗 1
 電 源 2
 伝 達 204
 伝搬定数 219
 電流拡大率 190
 電流源 21
 電流増幅率 206
 電流則 6, 62

【と】

等価電圧源の定理 81
 等価電流源の定理 83
 特性インピーダンス 220
 ド・モアブルの定理 28

【に】

入力インピーダンス 103
 二端子対回路 185, 202

【の】

ノートンの定理 82

【は】

ハイブリッド行列 205
 波形率 115
 波高値 10
 波高率 116
 はしご形回路 198
 パール 51
 反射係数 224
 半値幅 189

【ひ】

ひずみ波交流 110
 ひずみ率 116
 非正弦波交流 110
 皮相電力 50
 非対称三相交流回路 158
 微分回路 143

【ふ】

ファラド 19
 ファンダメンタルパラメータ 207
 フェーザ図 34
 フェーザ表示 32
 フェーザ表示法 27
 フォスター形回路 197
 複素インピーダンス 36
 複素記号法 27
 複素数の共役 27
 複素数表示 32
 複素電力 52
 複素平面 27
 不平衡負荷 162
 フーリエ級数 116
 ブリッジ回路 88
 ——の平衡条件 89
 ブロンデルの定理 174
 分布定数回路 217

【へ】

閉回路 63
 平均値 13
 平衡負荷 160
 並直列行列 206
 並列回路 4
 並列共振 190
 並列接続 40
 ベクトル記号法 27
 ベクトル軌跡 186
 ベクトル図 34
 ベクトル表示 32
 ヘルツ 10
 偏 角 28
 変成器 107
 ヘンリー 18

【ほ】

帆足 - ミルマンの定理 84

鳳-テブナンの定理	81	誘導素子	19	臨界制動	152
星形結線	92, 159				
補償起電力	86	【よ】		【る】	
補償の定理	86	容量性リアクタンス	38	ループ	63
ボルト	1	容量素子	20	ループ法	68
ボルトアンペア	51				
		【り】		【れ】	
【む】		リアクタンス	38	零点	192
無効電力	51	リアクタンス回路	191	連分数	200
		リアクタンス関数	194		
【φ】		力率	50	【わ】	
有効電力	50	理想変圧器	106	ワット	51
誘導性リアクタンス	38	利得	208	和動的	99

【A】		【H】		【Y】	
AC回路	3	H行列	205	Y行列	203
		Hパラメータ	205	Y結線	92, 159
【D】				Yパラメータ	203
DC回路	3	【I】		Y負荷	159
		IEC	54		
【F】		IEEE	41	【Z】	
F行列	206	ISO	54	Z行列	204
Fパラメータ	207			Zパラメータ	204
		【J】		~~~~~	
【G】		JIS	54	Δ結線	92, 159, 160
G行列	206			Δ負荷	160
Gパラメータ	206	【S】			
		sinc関数	118		

— 著者略歴 —

清水 教之 (しみず のりゆき)

1979年 名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程
修了 (電気工学専攻)
工学博士

1999年 名城大学教授
現在に至る

中條 渉 (ちゅうじょう わたる)

1980年 東北大学大学院工学研究科博士前期課程
修了 (電気及び通信工学専攻)

1993年 博士 (工学) (東京工業大学)

2008年 名城大学教授
現在に至る

飯岡 大輔 (いとおか だいすけ)

2004年 名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程
修了 (電気工学専攻)
博士 (工学)

2010年 名城大学准教授
現在に至る

村本 裕二 (むらもと ゆうじ)

1995年 豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士
後期課程修了 (総合エネルギー工学専攻)
博士 (工学)

2006年 名城大学助教授

2007年 名城大学准教授
現在に至る

伊藤 昌文 (いとう まさふみ)

1991年 名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程
単位取得退学 (電子機械工学専攻)

博士 (工学)

2009年 名城大学教授
現在に至る

基礎からの電気回路論

Fundamentals of Electric Circuits © Shimizu, Muramoto, Chujo, Itoh, Iioka 2012

2012年2月20日 初版第1刷発行



検印省略

著者	清水 教之
	村本 裕二
	中條 渉
	伊藤 昌文
	飯岡 大輔
発行者	株式会社 コロナ社
	代表者 牛来真也
印刷所	新日本印刷株式会社

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 978-4-339-00827-2

(横尾) (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