

## 改訂版のはしがき

---

“Am Anfang, war das Wort.” 「はじめに言葉ありき（ヨハネ福音書）」、同様に現代社会では“はじめに電気ありき”です。電波以外は回路システムで、その知見の集約が回路理論ですから、これは科学技術の常識です。この『改訂回路理論（1）、（2）』は、そういう認識に立ち、電気回路理論を包括的にコンパクトにまとめた講義テキストとして、コロナ社大学講義シリーズ拙著『回路理論』を全面的に改訂したものです。

（1）、（2）巻を通じて、『教える』とは『教わるなり』という古諺<sup>こげん</sup>どおりに、筆者の受講と授講の両体験に基づいて記述しました。例えば『起電力』とは『電力』ではない、というぐあいです。また理解しやすくするために演習問題を例題として本文に取り込み、その略解の説明からも一般論を誘導しています。さらに通常の『響』<sup>ひそみ</sup>にならって、先に交流理論を述べ、続いて過渡現象論、最後に回路シミュレーションに触れています。

（1）巻の本書では、電流、電圧という回路の基本量から非正弦波交流回路までを述べ、専門基礎科目として1～2セメスターを目標としています。

本編集機構の方々、特に科学技術会議議員、元・大阪大学総長、熊谷信昭先生のご推薦を得て出版の機会を与えられましたことを深謝致しますとともに、原稿の遅延にもかかわらず再版に応じられたコロナ社の方々に厚く御礼を申し上げます。推敲にもかかわらず過誤を恐れています。お気づきの点、あるいは質問はコロナ社編集部までお願いいたします。

指揮者 Bruno Walter にならい、厳しい批判により筆者を激励してくれる妻石井公子 に本書を捧げます。

1998年1月

石井 順也

## は し が き

---

本書は大学講義シリーズの1巻で、その内容を電気回路解析の重点的な説明とした。執筆に際して留意した努力目標は次のとおりである。

- i) 教科書としての機能から原理的な面を重視するとともに、現場技術者ならびに独習者の参考書として役立つように配慮する。そのためにすべての項目に例題と類題、各章末に演習問題を配する。
- ii) 回路の概念を明確にすると同時に回路理論で用いられる量をできるだけ自然に導入する。そのために公理主義というよりも回路理論の主体性を尊重した記述とする。
- iii) シリーズの1巻ではあるけれども独立した書物としての体裁から、いわゆる“self-contained”とする。すなわち交流理論を既に学び、あるいはこれから学ぼうとする双方の学習者にとって有益な説明とする。

以上の理想実現を目指して努力したが実状がこれほど遠いものであろうことはいうまでもない。またページ数の関係で波形の取扱いとヘビサイドの演算子法などは割愛した。読者にはこれらの事情を諒とされ、更に筆者の不注意による誤記に対しては率直な御叱正を念願するものである。

本書執筆の機会を与えられた大阪大学熊谷信昭教授、東京工業大学岸源也教授、ならびに本シリーズ編集機構の各位に深謝の意を表す。比較的短時間に脱稿することができたのは本学藤本英昭講師のバックアップに負う所が多く、またコロナ社編集部の中俣寛氏、高山茂氏には編集上大変お世話になった。あわせて記して感謝の意を表すしだいである。

1977年4月

石井 順也

# 目 次



## 回 路 素 子

1.1	回路と回路理論	1
1.2	電荷と電流	2
1.3	電位と電圧	5
1.4	電力と電力量	7
1.5	抵抗器	13
1.5.1	オームの法則	13
1.5.2	抵抗の直列回路・並列回路	15
1.5.3	ホイートストンブリッジ	18
1.5.4	抵抗温度係数と抵抗率	19
1.6	コンデンサ	21
1.6.1	コンデンサの基本式	21
1.6.2	コンデンサの直列回路・並列回路	22
1.7	コイル	25
1.7.1	コイルの基本式	25
1.7.2	コイルの直列回路・並列回路	27
1.8	相互誘導回路	28
1.8.1	相互誘導回路の基本式	29
1.8.2	密結合変圧器	33
1.8.3	理想変圧器	33
1.9	電 源	34
1.9.1	電圧源等価回路	34
1.9.2	電流源等価回路	35

1.9.3 従属電源	37
------------	----



## 交流理論——交流回路計算法——

2.1 正弦波交流電圧と正弦波交流電流	38
2.2 交流の実効値	40
2.3 交流回路の電力と電力量	42
2.4 フェーザ	44
2.5 フェーザに関するキルヒホッフの法則	45
2.6 回路素子におけるフェーザ電流とフェーザ電圧	47
2.7 インピーダンス $Z$ , アドミタンス $Y$ および複素電力 $P_c$	50
2.8 基本交流回路の解析	53
2.9 供給電力最大の条件	61
2.10 定入力抵抗回路	63
2.11 インピーダンスの $Y$ - $\Delta$ 変換	65
2.12 交流ブリッジ回路	68
2.13 共振回路	75



## 交流解析

3.1 節点解析	83
3.1.1 節点-枝接続行列	85
3.1.2 節点方程式	88
3.2 カットセット解析	92
3.2.1 木と補木	92
3.2.2 基本カットセット	94
3.2.3 カットセット方程式	96

3.3	タイセット解析	99
3.3.1	基本タイセット	99
3.3.2	タイセットベクトルとカットセットベクトルとの直交	100
3.3.3	タイセット方程式	103
3.4	網目解析	105
3.5	交流回路の定理	108
3.5.1	重ね合せの理	108
3.5.2	双対の理	110
3.5.3	等価電源の定理	111
3.5.4	可逆定理	116
3.5.5	補償定理	120

## 4 二ポート

4.1	二ポートのインピーダンス行列 $Z$	123
4.2	二ポートのアドミタンス行列 $Y$	126
4.3	二ポートの縦続行列 $K$	128
4.4	$Z$ , $Y$ , $K$ の相互関係	131
4.5	二ポートのその他の行列	133
4.6	二ポートの接続	135
4.7	対称二ポート	143
4.8	伝達係数と伝送量	148
4.9	絶対レベル	155
4.10	映像パラメータ, 反復パラメータ	156

## 5 非正弦波交流回路

5.1	フーリエ級数	161
-----	--------	-----

5.2	特殊関数のフーリエ係数とフーリエ級数展開	166
5.3	非正弦波交流波形とフーリエ級数展開式との関係	172
5.4	非正弦波交流波形のパラメータ	173
5.5	非正弦波交流回路の計算	174
5.6	複素フーリエ級数	175

## 付 録

---

1.	標準数	178
1.1	R シ リ ー ズ	178
1.2	E シ リ ー ズ	179
2.	電子機器用小形固定抵抗器の規格と表示	180
2.1	抵抗器の種類とその記号	180
2.2	抵抗器の定格電力とその記号	180
2.3	公称抵抗値とその記号	181
2.4	抵抗値許容差とその記号	182
2.5	抵抗器のカラーコード	182
3.	電子機器用固定コンデンサの規格と表示	183
3.1	コンデンサの種類とその記号	184
3.2	コンデンサの定格電圧とその記号	184
3.3	公称静電容量とその記号	184
3.4	静電容量許容差	184
3.5	コンデンサへの表示	185

## 参 考 文 献

## 索 引

# 「改訂 回路理論(2)」主要目次

## 6. 三相回路

- 6.1 結合三相回路
- 6.2 三相電圧と電流
- 6.3 三相電力
- 6.4 回転磁界
- 6.5 対称座標法
- 6.6 三相交流発電機の基本式

## 7. 分布定数回路

- 7.1 分布定数線路
- 7.2 分布定数線路の正弦波定常解
- 7.3 送端・受端の条件
- 7.4 線路のパラメータ
- 7.5 反射と透過
- 7.6 電圧定在波
- 7.7 無損失線路の共振
- 7.8 Sパラメータ

## 8. 過渡現象論 —— 求積法による過渡現象計算法 ——

- 8.1 回路の初期条件
- 8.2  $RL$  直並列回路の過渡現象
- 8.3  $RC$  直並列回路の過渡現象
- 8.4  $RLC$  直並列回路の過渡現象
- 8.5  $RLC$  直列回路の過渡現象
- 8.6 相互誘導回路の過渡現象
- 8.7 単独の回路素子の直流応答
- 8.8  $L$  と  $C$  の変化

## 9. 回路の応答 —— ラプラス変換法 ——

- 9.1 ラプラス変換
- 9.2 ラプラス変換による回路解析
- 9.3 回路のシステム関数
- 9.4 インパルスレスポンス
- 9.5 ステップレスポンス
- 9.6 周波数応答
- 9.7 分布定数回路の応答

## 10. 回路シミュレーション —— 回路の数値解析 ——

- 10.1 節点方程式の数値解法
- 10.2 状態方程式の数値解法
- 10.3 分布定数線路の数値解析
- 10.4 非線形回路素子 (白熱電球)



# 回路素子

電流と電圧で動作状態が記述できるものを回路という。回路の基本的な構成要素は抵抗器、コイルおよびコンデンサで、これらを回路素子という。トランス、伝送線路、トランジスタなどは、これらの回路素子で等価的に回路表現される。本章では、はじめに電流と電圧、ならびに電力と電力量を説明し、次いで回路素子について述べる。

## 1.1 回路と回路理論

線状の導体を**導線** (lead wire) という。**回路** (circuit) とは、**回路素子** (circuit element) を導線で電氣的に接続したもので、その動作状態が電流と電圧で記述できるものである。回路素子として、後述の電気抵抗器、コイル、コンデンサ、トランス、伝送線路および電源からなるものを**電気回路** (electric circuit) といい、さらにダイオードとトランジスタを含むものを**電子回路** (electronic circuit) という。ネットワークは大規模で複雑な回路網の意味にも用いられるが、通常は情報通信回線網を意味する。

導線を接続する回路素子の部分は電氣的には点であって、これを回路素子の**端子** (terminal) または回路の**節点** (node) という。回路素子はその端子を通



してのみ、外部と電磁エネルギーの授受ができるものとする。回路素子を記号化し、接続導線を線で描いたものを**回路図** (circuit diagram) または**配線図** (wiring diagram) という。節点は黒丸で、外部へ接続する回路の端子は白丸で表すのが普通である。回路の構造は異なるが端子から見た電圧・電流の関係が同じ回路を**等価回路** (equivalent circuit) という。

回路素子の種類に無関係な議論では、回路素子をブロックで表す。また部分回路をブロックで表すこともあり、これを**ブロックダイアグラム** (構成図, block diagram) という。さらに簡略化して単なる線で表すこともあり、これを回路グラフという。

ICなどの現実の装置を回路表現したものを回路モデルといい、その過程をモデリングという。回路素子は回路モデルの最小単位である。装置を回路モデルで表現し、その動作を調べることを回路解析、逆の問題を回路合成という。本書は電気回路の解析を扱っている。

## 1.2 電 荷 と 電 流

導線の断面を  $\Delta t$  秒間に  $\Delta q$  [C] の割合で**電荷** (electric charge) が流れているとき

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} \quad [\text{C/s}]$$

を  $\Delta t$  秒間内の平均電流という。  $\Delta t \Rightarrow 0$  の極限

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} = i(t) = i \quad [\text{A}] \quad (1.1)$$

を瞬時電流 (instantaneous current), 時間的に変化しない一定の電流のときは  $I$  と書いて**直流電流** (direct current, DC) という。

導線を電流  $i(t)$  が流れているときの通過電荷量  $q(t)$  は式(1.1)から

$$q(t) = q = \int_0^t i(t) dt + Q_0 \quad [\text{C}] \quad (1.2 a)$$

$$Q_0 = \int_{-\infty}^0 i(t) dt \quad (1.2 b)$$

$Q_0$  は  $t=0$  以前に通過した電荷量で**初期電荷**という。 $Q_0=0$  のとき、直流電流  $I$  と  $q$  との関係は式(1.2)から

$$q = It \quad [\text{C}] \quad (1.3)$$

電荷の単位はクーロン [C] で、電流の単位はアンペア [A] である。上の関係から  $1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$  となる。

電池の蓄積電荷量すなわち蓄電池の電気容量  $Q$  を表現する場合には  $1 \text{ A} \cdot \text{h}$  または  $1 \text{ A} \cdot \text{H}$  を用いて表し、これをアンペアアワー(公称)容量とって  $Q[\text{A} \cdot \text{h}]$  と書く。

$$1 \text{ A} \cdot \text{h} = 3600 \text{ A} \cdot \text{s} = 3600 \text{ C} \quad (1.4)$$

回路図では電流の流れる向きを矢印で示す。ある向きの電流が  $i(t)$  のとき、逆向きは  $-i(t)$  である。矢印は符号を含んだ  $i(t)$ 、 $I$  自身の向きで、**電流の基準方向**という(図 1.1 参照)。

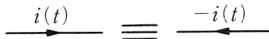


図 1.1 電流の基準方向

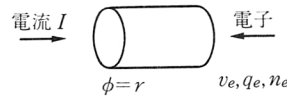


図 1.2 導体中の電子の移動と電流

図 1.2 のように  $I$  [A] の直流電流が半径  $r$  [cm] の円柱状導体を矢印の向きに流れているとき、電荷  $q_e$  [C] の全自由電子  $n_e$  [個/cm<sup>3</sup>] が  $v_e$  [cm/s] の速度で移動したものとすると

$$I = v_e \times r^2 \pi \times q_e \times n_e$$

電子の電荷  $q_e = -1.6020 \times 10^{-19} \text{ C}$  で、銅線の場合、 $n_e = 5.5 \times 10^{22}$  個/cm<sup>3</sup> であるから、 $I = 100 \text{ A}$ 、 $r = 1.5 \text{ mm}$  のときの電子の移動速度  $v_e$  は  $v_e = -0.1606 \text{ cm/s}$  となる。負の符号は、電子の電荷  $q_e$  が負であるためで、電子は電流  $I$  の基準方向(プラスの電流の向き)とは逆向きに流れていることを示す。

ところでこの移動速度は、日常経験する電流が導線を伝わって流れる速さに比べて極端に遅い。じつは電流が伝わる速度は周囲の媒質によっても変わるこ

とから、電子の粗密の波の動き、すなわち**波動** (wave motion) であることがわかる。この伝搬速度、あるいは伝播速度  $v_p$  は空気中の銅線の場合、光速  $c = 3 \times 10^{10}$  cm/s より少し遅い程度である。したがって、直流電流が日常的な長さの導線の一端から流れはじめると、ほとんど瞬間的に導線上いたるところで同じ電流が同時に流れはじめると考えてよい。これを導線の電流の一意性という。すなわち、伝搬に要する遅延時間  $t_d$  が無視できるような使い方をするときに成立する。

この意味で電磁気学では直流電流を“定常”電流というが、回路理論でいう“定常”電流は後述の定常状態の電流であって必ずしも直流電流を意味しない。瞬時電流  $i(t)$  の変化が遅延時間  $t_d$  に比較して緩慢であれば、同じことがいえる。この場合の電流を、電磁気学では準定常電流といっている。

このような導線は伝搬という面から見ると長さが認識できないので、電気的長さ、すなわち**電気長** (electrical length) がゼロであるという。以上に対して遅延時間内での瞬時電流の変化が激しい場合は、導線の長さ方向に沿っての瞬時電流は時間  $t$  と距離  $x$  の関数になる。この場合を**分布定数線路**という (第7および10章参照)。

回路の電流に関する基本法則は、節点における電荷の不生不滅を定式化したつぎのキルヒホッフの電流法則である。

### 節点におけるキルヒホッフの電流法則 (Kirchhoff's current law, KCL)

『節点における電流の代数和は恒等的にゼロに等しい。』

$$\sum(\text{電流}) \equiv 0 \text{ A} \quad (\text{任意の時刻 } t \text{ において}) \quad (1.5)$$

この式の  $\sum$  は一つの節点における**電流の代数和**を表すものとする。ただし電流の代数和とは、例えば流出電流には“+”，流入電流には“-”の符号をつけて加えることをいう。この法則は電流が直流電流、瞬時電流、あるいはそれらの混在のいずれの場合に対しても成立する一般的なものである。ただし後述の実効値については、一般的には成立しない。

**【例題】1.1** 図 1.3 において、直流電流  $I_1 = 5 \text{ A}$ ,  $I_2 = 1 \text{ A}$ ,  $I_4 = 4 \text{ A}$  であった。 $I_3$  を求めよ。

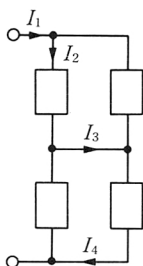


図 1.3 KCL 適用の回路例

答  $I_3 = 0 \text{ A}$

回路素子または回路の内部で電荷は不生不滅であるから、それらの端子電流についてキルヒホッフの電流法則が成立する。特に 2 個の端子をもつ回路素子、すなわち二端子回路素子では、一つの端子から流入する電流は他端子より流出する電流につねに等しい。このような 2 個の端子を**端子対** (terminal-pair), あるいは**ポート** (port) という。二端子回路素子は一端子対あるいは一ポート回路素子ともよばれる。

図 1.4 の回路を**直列回路**という。各節点の KCL より直列回路では全電流はつねに等しい。電流の測定器を電流計といい、被測定回路に直列に接続する。

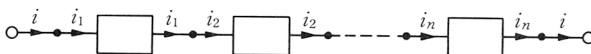


図 1.4 直列回路

### 1.3 電位と電圧

空間に分布した点電荷の相互の位置の変化が光速に比較して緩慢なとき、それらによる電界を**クーロン電界**という。クーロン電界内で  $1 \text{ C}$  の点電荷を無限遠点から回路の端子  $p$  までもってくるのに必要な電気的エネルギーが  $u$  ジュール [J] のとき、端子  $p$  の電位を  $u$  ボルト [V] とする。無限遠点は電位ゼロと仮定されているが、実際には接地を電位ゼロとする。

2 個の端子間の電位差を**電圧** (voltage) という。すなわち 2 個の端子  $p_1, p_2$

の電位をおのおの  $u_1, u_2$  とするとき、つぎの  $v_{12}$  を端子  $p_2$  から端子  $p_1$  への電圧という。

$$v_{12} = u_1 - u_2 \quad [\text{V}] \quad (1.6)$$

時間  $t$  により変化する場合は瞬時電圧 (instantaneous voltage)  $v(t) = v$ , 時間に対して一定の場合は  $V$  と書いて**直流電圧** (direct voltage) という。この場合の“直流”とは“一定の”という意味であって電流ではない。回路図に電圧の基準方向を示すには、例えば図 1.5 のような矢印で示す。

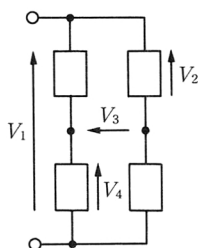


図 1.5 KVL 適用の回路例

回路の電圧に関する基本法則は、キルヒホッフの電圧法則である。任意の節点から回路素子をたどって別の任意の節点まで到達できる回路を「連結である」という。連結回路で初めと終わりの節点  $p_a$  は同一で、中間の節点はすべて異なっているような節点の列 ( $p_a, p_b, p_c, \dots, p_n, p_a$ ) を考え、かりに節点閉路列ということにする。特に各節点間に直接的に回路素子が存在する場合は、これらの回路素子の集合を**タイセット** (tie set) あるいは**ループ** (loop) または**閉路** (closed loop) という。ある節点閉路列またはループに沿って一巡するとき、この向きに一致する電圧には“+”，逆向きの電圧には“-”をつけて加えることを**電圧の代数和**という。電圧は2点間の電位差であるから、つぎのキルヒホッフの電圧法則が成立する。

#### キルヒホッフの電圧法則 (Kirchhoff's voltage law, KVL)

『節点閉路列またはループに沿う電圧の代数和はつねにゼロである。』

$$\sum_{k=1}^n v_k(t) \equiv \sum_{k=1}^n v_k \equiv 0 \text{ V} \quad (\text{任意の時刻 } t \text{ において}) \quad (1.7)$$

ここで上式の  $\sum$  は、節点閉路列またはループに沿う電圧の代数和を意味するも

# 索引

## 【A】

アドミタンスパラメータ 127  
網目 105  
網目電流 107  
網目方程式 107  
アンペアアワー 3  
アンペアターン 59

## 【B】

バートレットの二等分定理 147  
ボード線図 55  
ブリッジ回路 68

## 【C】

直流電圧 6  
直流電流 2  
直流起電力 11  
直流電圧源 35  
直流電流源 36

## 【D】

デフォルト 45  
電圧 6  
電源 10  
電荷 2  
電力スペクトル 162  
伝送回路 123  
伝送関数 149  
伝達アドミタンス 82, 128

伝達インピーダンス 81, 126

伝達特性 123  
導電率 20  
動作減衰量 152  
動作位相量 152  
導線 1

## 【E】

枝 83  
エラストランス 21

## 【F】

フェーザ電圧 44  
負荷 10  
複素フーリエ係数 175  
フーリエ係数 162

## 【G】

減衰量 150  
偶モード励振 145  
逆回路 63  
Gibbs の現象 165

## 【H】

ハイブリッド行列 134  
ハイブリッドコイル 59  
反共振周波数 56  
半波整流波形 165  
はしご形回路 16  
平面グラフ 105  
変圧器 28

ヘルツ 40  
皮相電力 42  
ひずみ波形 173  
ひずみ率 173  
方形波 165

## 【I】

インダクタ 25  
インピーダンスパラメータ 124

位相 39  
位相同形 85  
位相差 43

## 【J】

時間領域 49  
自己インダクタンス 26  
軸対称二ポート 145  
縦続パラメータ 129  
縦続接続 135

## 【K】

可逆二ポート 132  
開放除去 22  
角周波数 39  
カットセット解析 97  
結合係数 30  
基本カットセット 95  
基本カットセットベクトル 95  
基本カットセット行列 94  
基本タイセット行列 100  
基準節点 87

奇モード励振 145  
 キルヒホッフの電圧法則 7  
 キルヒホッフの電流法則 4  
 コンダクタンス 14  
 交番電圧 38  
 交番電流 38  
 交流電圧 38  
 交流電力量 44  
 交流電流 38  
 交流解析 83  
 固有電力 62  
 駆動点アドミタンス 128  
 駆動点インピーダンス 125  
 キャパシタ 21  
 キャパシタンス 21  
 共振  $Q$  78  
 共振周波数 54  
 KCL 4  
 KVL 7

---

〔M〕

無効電力 43

---

〔N〕

二ポート 123  
 のごり波 167  
 ノートンの定理 113

---

〔P〕

ポート 5  
 プロダクトブリッジ 69

---

〔Q〕

$Q$  75

---

〔R〕

レシオブリッジ 69  
 リアクタンス 54  
 リアクタンス回路 43  
 リラクタンス 26  
 ループ 7  
 r.m.s.値 41

---

〔S〕

最大有能電力 62  
 サイクル 39  
 サセプトランス 56  
 正弦波 38  
 線スペクトル 162  
 節 点 1  
 節点変換 87  
 節点方程式 88  
 周波数ブリッジ 69  
 振 幅 39

相互インダクタンス 29  
 相反定理 116  
 挿入減衰量 154  
 双対回路 63  
 瞬時電圧 6  
 瞬時電力 12  
 瞬時電流 2  
 瞬時起電力 13  
 周波数 40  
 周波数領域 49  
 周波数スペクトル図 162  
 周波数特性 55

---

〔T〕

タイセット 7  
 タイセット解析 104  
 対称波 170  
 短絡除去 26  
 テブナンの定理 111  
 抵 抗 14  
 トランス 28  
 等価回路 2

---

〔Y〕

容量リアクタンス 48  
 容量サセプトランス 48  
 誘導リアクタンス 48  
 誘導サセプトランス 48  
 有効電力 42

— 著者略歴 —

1953年 大阪大学工学部通信工学科卒業  
1958年 大阪大学大学院博士課程修了（通信工学専攻）  
1959年 工学博士（大阪大学）  
1965年 近畿大学教授  
2002年 近畿大学名誉教授

改訂 回路理論（1）

Circuit Theory（1）

© Junya Ishii 1977, 1998

1977年 6月10日 初版第1刷発行  
1980年 7月20日 初版第3刷発行  
1998年 2月20日 改訂版第1刷発行  
2003年 10月30日 改訂版第2刷発行

検印省略

著者 いし い じゅん や  
石井 順也  
大阪府池田市伏尾台1-22-2  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来辰巳  
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 4-339-00141-4

(高橋) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします