

E

復刻版

エレクトロニクス
実務シリーズ

E l e c t r o n i c s

増幅回路の設計法から実装ノウハウ

新・低周波/高周波回路 設計マニュアル

鈴木雅臣^[著]

見本

CQ出版社

第1章

トランジスタを動かす

現在、電子回路で使われている増幅素子にはいろいろなものがあります。トランジスタやFETをはじめとして、フォト・カプラ、広い意味ではサイリスタやトライアックなども増幅素子と考えることができます。

また、最近ではICやLSIの設計製造技術の発達に伴い、トランジスタやFETの集合体であるOPアンプも、一つの増幅素子と考えて、手軽に使うことができるようになりました。

この章では、これらの増幅素子の最も基本的なものとしてトランジスタを採り上げ、その増幅原理を回路動作的に説明します。

IC/LSIの時代に、トランジスタによる増幅回路はあまり意味がないように思われますが、トランジスタやFETが使えるか否かで回路の性能は大きく異なるのです。まだまだ、トランジスタやFETの価値は大きいのです。

1.1 トランジスタで増幅する

● トランジスタの構造

通常トランジスタというと、バイポーラ・トランジスタをさします。

トランジスタは、制御端子(ベース)の電流を制御して、半導体中の電子や正孔の流れ(電流)を制御します。このため、**電流制御素子**と呼ばれています(後述するFETは、これに対して**電圧制御素子**と呼ばれている)。

トランジスタは、その構造によりNPN型とPNP型の2種類に分類することができます。図1.1にその構造を示します。また、図1.2にトランジスタの代表的な外形を示します。基本的には3本足で構成されたデバイスです。外形が大きくなっているデバイスは、その分、大きな電気信号を扱えるというもので、データシートなどを見ると、小信号用とか大電力信号用とかの分類も行われています。

NPNトランジスタは、Pチャネル半導体をNチャネル半導体ではさんだ構造になってい

図1.1 トランジスタの構造

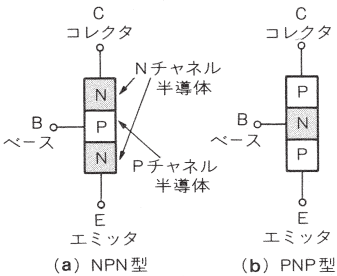
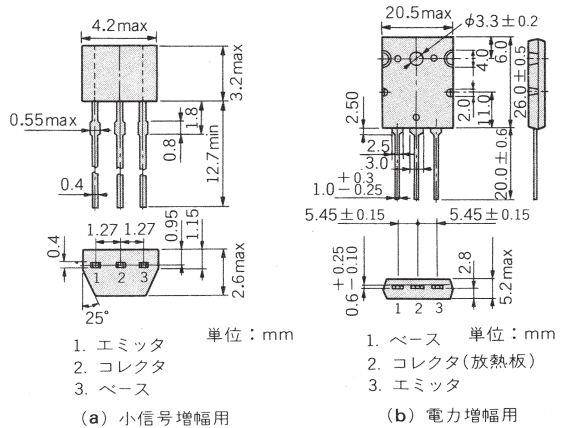


図1.2 トランジスタの外形例(このほかにも多くのパッケージがある)



ます。また、PNPトランジスタは、Nチャネル半導体をPチャネル半導体ではさんだ構造になっています。どちらの構造のトランジスタも、ベース-コレクタ間とベース-エミッタ間の2箇所にPN接合があります。したがって、PN接合だけを考えると、トランジスタの等価回路は図1.3のように二つのダイオードで表されます。もちろん、ダイオードを図のように接続してもトランジスタにはなりません。トランジスタの良否をテストなどで判定するときはこの図の等価回路を知っていると役に立ちます。

● ベース電流を増幅する

トランジスタの各端子への電流の向きは、図1.4のようになります。ベース電流 I_B 、コレクタ電流 I_C 、エミッタ電流 I_E の間には、以下のような関係があります。

$$I_E = I_B + I_C \quad (1-1)$$

NPNトランジスタとPNPトランジスタでは、電流の向きがまったく逆になります(トランジスタのエミッタを示す矢印は、エミッタの電流の向きを示している)。

また、 I_C と I_B の比を直流電流増幅率 h_{FE} と呼び、次のような関係があります。

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1-2)$$

さらに、 I_C の微小変化分 ΔI_C と I_B の微小変化分 ΔI_B の比を交流電流増幅率 h_{fe} と呼び、次のように表します。

図1.3 PN接合だけを考えたトランジスタの等価回路

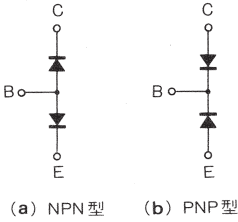
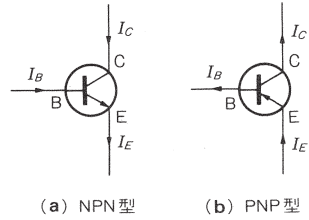


図1.4 トランジスタの入出力電流



項目	記号	定格	単位
コレクタ・ベース間電圧	V_{CB0}	50	V
コレクタ・エミッタ間電圧	V_{CE0}	50	V
エミッタ・ベース間電圧	V_{EB0}	5	V
コレクタ電流	I_C	150	mA
ベース電流	I_B	50	mA
コレクタ損失	P_C	200	mW
接合温度	T_j	125	°C
保存温度	T_{stg}	-55~125	°C

(a) 最大定格 ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

表1.1⁽¹⁾ 小信号増幅用トランジスタ 2SC2458の特性

項目	記号	測定条件	最小	標準	最大	単位
コレクタシャ断電流	I_{CB0}	$V_{CB} = 50\text{V}, I_E = 0$	—	—	0.1	μA
エミッタシャ断電流	I_{EB0}	$V_{EB} = 5\text{V}, I_C = 0$	—	—	0.1	μA
直流電流増幅率	h_{FE} (注)	$V_{CE} = 6\text{V}, I_C = 2\text{mA}$	70	—	700	
コレクタ・エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	$I_C = 100\text{mA}, I_B = 10\text{mA}$	—	0.1	0.25	V
トランジション周波数	f_T	$V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 1\text{mA}$	80	—	—	MHz
コレクタ出力容量	C_{ob}	$V_{CB} = 10\text{V}, I_E = 0, f = 1\text{MHz}$	—	2.0	3.5	pF
雑音指数	NF	$V_{CE} = 6\text{V}, I_C = 0.1\text{mA}, f = 1\text{kHz}, R_g = 10\text{k}\Omega$	—	1.0	10	dB

(注) h_{FE} 分類 O: 70~140, Y1: 120~240, GR: 200~400, BL: 350~700

(b) 電気的特性 ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

$$h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad \left(= \frac{\partial I_C}{\partial I_B} \right) \quad (1-3)$$

通常、 h_{FE} と h_{fe} はほぼ等しく、データシートには h_{FE} が記載されています。

項目	記号	定格	単位
コレクタ・ベース間電圧	V_{CB0}	200	V
コレクタ・エミッタ間電圧	V_{CE0}	200	V
エミッタ・ベース間電圧	V_{EB0}	5	V
コレクタ電流	I_C	15	A
ベース電流	I_B	15	A
コレクタ損失 ($T_a=25^\circ\text{C}$)	P_C	150	W
接合温度	T_j	150	$^\circ\text{C}$
保存温度	T_{stg}	-55~150	$^\circ\text{C}$

(a) 最大定格 ($T_a=25^\circ\text{C}$)表1.2⁽¹⁾ 電力増幅用トランジスタ
2SC3281の特性

項目	記号	測定条件	最小	標準	最大	単位
コレクタシャ断電流	I_{CB0}	$V_{CB}=200\text{V}, I_E=0$	—	—	5.0	μA
エミッタシャ断電流	I_{EB0}	$V_{EB}=5\text{V}, I_C=0$	—	—	5.0	μA
コレクタ・エミッタ間降伏電圧	$V_{(BR)CEO}$	$I_C=50\text{mA}, I_B=0$	200	—	—	V
直流電流増幅率	$h_{FE(1)}$ (注)	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=1\text{A}$	55	—	160	—
	h_{FE}	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=8\text{A}$	35	60	—	
コレクタ・エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	$I_C=10\text{A}, I_B=1\text{A}$	—	0.4	3.0	V
ベース・エミッタ間電圧	V_{BE}	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=8\text{A}$	—	1.0	1.5	V
トランジション周波数	f_T	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=1\text{A}$	—	30	—	MHz
コレクタ出力容量	C_{ob}	$V_{CB}=10\text{V}, I_E=0, f=1\text{MHz}$	—	270	—	pF

(注) $h_{FE(1)}$ 分類 R: 55~110, O: 80~160(b) 電氣的特性 ($T_a=25^\circ\text{C}$)

h_{FE} は、小信号用トランジスタで100~500程度、電力増幅用トランジスタでは50~100程度の値です。 h_{FE} は同一品種のトランジスタでも個々にばらつきがあり、 h_{FE} の値により何段階かにランク分けをしているものもあります。

代表的なトランジスタとして、表1.1に小信号増幅用トランジスタ2SC2458、表1.2に電力増幅用トランジスタ2SC3281の特性を示します。2SC2458は、 h_{FE} の値により四つのランクに分類され、2SC3281は二つのランクに分類されています。一般に電力増幅用トランジスタは、小信号用トランジスタと比較して各端子に大きな電流を流さなければならないので、構造上 h_{FE} をあまり大きくすることはできません。

トランジスタはこのように大きな h_{FE} を持っていますので、小さなベース電流で大きなコレクタ電流を得ることができることから、電流増幅作用があると表現されます。

図1.5 トランジスタへの直流電源の接続

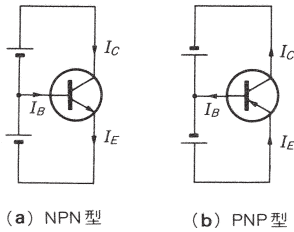


図1.6 トランジスタの接地回路(NPN型を示す)

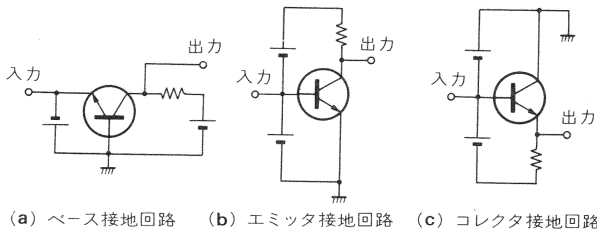


表1.3 各接地回路の比較

		ベース接地	エミッタ接地	コレクタ接地
電圧利得	A_v	大	大	1
電流利得	A_i	1	大	大
電力利得	A_p	中	大	小
入力インピーダンス Z_i		小	中	大
出力インピーダンス Z_o		大	中	小

● 増幅のための基本的な接続方法

実際の回路でトランジスタを使うには、図1.4に示したような方向にトランジスタの入出力電流を設定しなければなりません。そのためには、ベース-エミッタ間のPN接合が順方向に、ベース-コレクタ間のPN接合が逆方向になるように直流電源を接続します。

ここで重要なことは、トランジスタが増幅作用を行っているときは、ベース-エミッタ間のPN接合が常に順方向にバイアスされているということ、つまりベース-エミッタ間電圧 V_{BE} は、ダイオードの順方向電圧降下と同じ $0.6 \sim 0.7V$ になるということです。

図1.5にトランジスタに直流電源を接続したようすを示します。さらにこの回路で、どの端子を接地し(交流的に接地する)、どの端子に負荷抵抗を接続して出力を取り出すかによって、図1.6のようにベース接地、エミッタ接地、コレクタ接地と呼ぶ3種類の回路が考えられています。

それぞれの接地回路には、表1.3に示すような特徴があります。

ベース接地回路は、エミッタに信号を入力し、コレクタから出力を取り出します。このため、電流利得 A_i (入力電流 I_i と出力電流 I_o の比、 $A_i = I_o/I_i$)がほぼ1(正確には1より少し小さい)で、入力インピーダンスが低く、出力インピーダンスが高いというたいへん使いにくい回路です。しかし、この回路は入力と出力の容量的な結合が小さいため、高い周波数領域まで利得が必要な高周波回路の増幅器に使用されます。

エミッタ接地回路は、電圧利得 A_v (入力電圧 V_i と出力電圧 V_o の比、 $A_v = V_o/V_i$)、電流利得 A_i とも大きいので、増幅回路としてはもっとも多く使用される接地方式です。

コレクタ接地回路は、エミッタ・フォロウとも呼ばれ、電圧利得がほぼ1(正確には1より少し小さい)です。しかし、電流利得が大きく、入力インピーダンスが高く、出力インピーダンスが低いことから、バッファ・アンプ、電流増幅回路、インピーダンス変換回路などに使用されます。

コラム1.A トランジスタの V_{BE} について

トランジスタのベース-エミッタ間には、PN接合があります。これは、ベース-エミッタ間にダイオードが存在するとも考えられます。トランジスタが増幅作用を行っているときは、ベース-エミッタ間のPN接合を順方向にバイアスするため、 V_{BE} はダイオードの順方向電圧降下とまったく同じで、次式で求めることができます。

$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_C}{I_S} \quad [\text{V}] \quad (1-A)$$

ただし、

q : 電子の電荷量 1.6×10^{-19} [C]

k : ボルツマン定数 1.38×10^{-23} [J/K]

T : 絶対温度 [K]

I_C : コレクタ電流 [A]

I_S : PN接合の逆方向飽和電流 [A]

(通常 $0.01 \sim 1$ [pA] 程度)

このようにトランジスタの V_{BE} と I_C の関係は指数関数になっています。

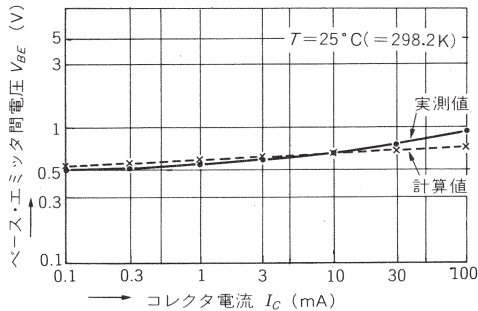
図1.Aに2SC2458の V_{BE} の実測値と $I_S=0.1\text{pA}$ として計算した値のグラフを示します。計算式で求めた値が実測値とよく一致していることがわかります。

さらに、 V_{BE} の温度係数 $T.C$ は上式を T で微分することにより求めることができ、次式のようになります。

$$T.C = \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} = \frac{k}{q} \ln \frac{I_C}{I_S} \quad (1-B)$$

ここでは、 $T.C$ の符号は考えていませんが、 V_{BE} は温度が上昇すると小さくなるため、 $T.C$ にはマイナス符号が付きます (V_{BE} の温度係数は負)。通常のトランジスタで、 $T.C$ は $-2.5\text{mV}/^\circ\text{C}$ 程度です。

図1.A 2SC2458のコレクタ電流 I_C -ベース・エミッタ間電圧 V_{BE} 特性



コラム1.B 増幅回路における接地方式とは

増幅器に信号を入力するときは、ほとんどの場合、入力端子とGNDの間に電圧を印加します。また、出力信号を取り出すときも、出力端子とGND間の電位差を出力電圧として取り出します。つまり、入力も出力もGNDを基準にしてその電位を決めています。し

図1.B 増幅回路の接地

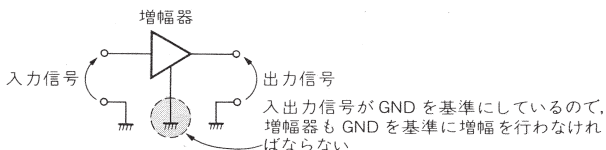
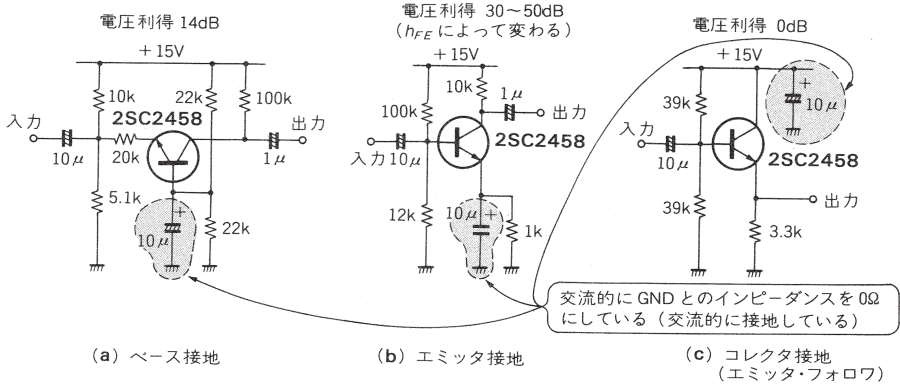


図1.C 実際の各種接地回路



たがって、増幅器もGNDを基準にして増幅しなければなりません。そのようすを図1.Bに示します。

トランジスタやFETを使用した増幅回路における接地方式とは、どの端子の電位を基準にして増幅を行っているかを示しています。たとえば、トランジスタのベース接地は、ベース電位を基準にして増幅を行っています(エミッタ接地、コレクタ接地についても同様)。さらに、前述したように増幅はGNDを基準にして行うため、増幅の基準とする端子をGNDに接続します(接地する)。

しかし実際の回路では、回路を動作させるため、増幅の基準となる端子に直流電位を与えなければなりません。そこで、コンデンサを介して接地し、交流的にGNDとのインピーダンスを零にしています(交流的に接地している)。

図1.Cにトランジスタを使用した各種接地回路の実例を示します。どの接地方式も、基準となる端子をコンデンサでGNDに接地しています。

1.2 トランジスタをON/OFFさせる

トランジスタを使用する回路は数多くありますが、最も代表的に使用されるのは小さな電流信号のON/OFFで、大きな電流信号をON/OFFさせるというスイッチング動作です。この用途は、デジタル回路のなかにも多く見られます。回路構成は基本的にエミッタ接地となるわけですが、トランジスタを完全にON/OFF(いわゆる飽和動作)で使う点が大きな特徴です。

このトランジスタを使ったスイッチ回路は、機械的な接点をもたないため、軽量で接点

図1.7 LED点灯回路(1)

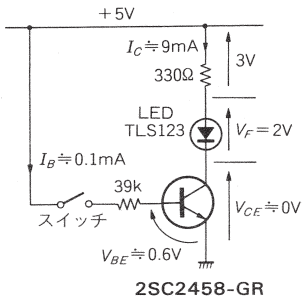
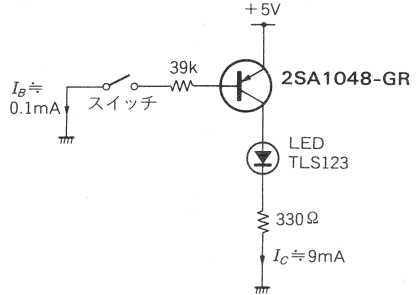


図1.8 LED点灯回路(2)



の摩耗がなく、高速スイッチングが可能などの特徴があります。そのため、LEDの点灯回路、リレーやモータのコイルのドライブ、スイッチング・レギュレータなど、広範囲に 응용されています。

● LEDを駆動する

図1.7にNPNトランジスタを使った簡単なLEDの点灯回路を示します。スイッチをOFFにするとトランジスタにベース電流が流れなくなるため、トランジスタはOFFし、LEDは消灯します。スイッチをONにするとトランジスタに約0.4mAのベース電流($I_B = (5V - 0.6V) / 39k\Omega \approx 0.1mA$)が流れてトランジスタがONし、LEDが点灯します。

トランジスタのコレクタ電流は、LEDの電圧降下 V_F が2V(LEDの順方向電圧降下 V_F は通常2V前後)、トランジスタがONしたときのコレクタ-エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ が約0V($V_{CE(sat)}$ は I_C を多く流すほど高くなるが、通常のトランジスタは I_C が100mA以下では $V_{CE(sat)} = 0.1V$ 以下)ですから、 $I_C \approx 9mA$ になります。

ここで、コレクタ電流はベース電流の h_{FE} 倍になっていないことに注意しなければなりません。2SC2458-GRの h_{FE} を200(表1.1参照)とすると、この回路ではコレクタ電流として $20mA (= 0.1mA \times 200)$ までドライブする能力がありますが、実際のコレクタ電流は負荷により制限されて9mAしか流れません。

このようにスイッチ回路では、トランジスタの h_{FE} のばらつきや、ベース電流の温度変化(V_{BE} が温度特性をもっているため、ベース電流も温度によって変化する)などを考慮して、ベース電流を少し多めに流しておきます。これをオーバ・ドライブといい、通常は使用するトランジスタの h_{FE} の最低値で計算したベース電流の1.5~2倍程度にします。

図1.9 リレー・ドライブ回路

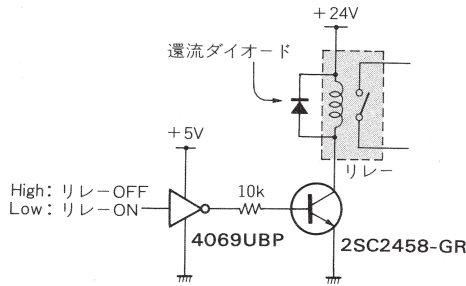


図1.8に、PNPトランジスタを使ったLED点灯回路を示します。PNPトランジスタを使うと、NPNトランジスタと電流の向きが逆になるだけで動作はまったく同じです。

● リレーのコイルを駆動する

図1.9に+5Vのデジタル回路から、リレーのコイルを駆動する回路を示します。このようにデジタル回路からモータやリレーなどのコイルを駆動することがよくあります。トランジスタは、ベース電流をスイッチすることにより負荷をON/OFFすることができますので、電源電圧が異なっても、トランジスタに十分なベース電流を流すことにより、負荷電流をスイッチすることができます。

なお、コイルをトランジスタでスイッチする場合は、コイルに流す電流をOFFするときに逆電圧を誘起し、トランジスタを破壊することがあります。必ずコイルと並列にダイオードを接続し、誘起電流を還流させます(還流ダイオードという)。

● h_{FE} をかせぐダーリントン接続

小さなベース電流でより大きな負荷電流をスイッチする場合は、トランジスタをダーリントン接続して使用します。図1.10にダーリントン接続を示します。 Tr_1 、 Tr_2 の h_{FE} をそれぞれ h_{FE1} 、 h_{FE2} とすると、 Tr_1 のコレクタ電流は $I_B \cdot h_{FE1}$ となります。また、コレクタ電流とエミッタ電流がほぼ等しいとすると、 Tr_1 のエミッタ電流も $I_B \cdot h_{FE1}$ となります。そして、 Tr_1 のエミッタ電流が Tr_2 のベース電流になりますから、 Tr_2 のコレクタ電流 I_C は、 $I_B \cdot h_{FE1} \cdot h_{FE2}$ となります。

たとえば、 h_{FE1} 、 h_{FE2} ともに100とすると、1mAのベース電流で10Aのコレクタ電流を

ISBN978-4-7898-5219-7

C3055 ¥2400E

CQ出版社

定価：本体2,400円(税別)



9784789852197



1923055024007

読者のみなさまへ

復刻版「エレクトロニクス実務シリーズ」につきまして

●小社は1964年の雑誌「トランジスタ技術」創刊以来、半導体ならびにエレクトロニクスの応用技術に関する書籍を多く発行してまいりました。しかしながら過去においては、限られた印刷技術により、相応の部数を確保できないと見なした書籍につきまして、採算面の都合から重版を行わず、「重版未定」といたしました。

●近年になってデータのデジタル化および印刷技術の進歩により、少数数での印刷・製本がある程度可能となりました。オンデマンド印刷と呼ばれております。

●一方、ご存知のようにエレクトロニクス技術の進歩は著しく、「トランジスタ技術」創刊のころ主流であったトランジスタやICによるアナログ回路技術、デジタル回路技術は、マイコンの登場以来、ブラックボックス化したり、抽象化して扱う傾向が多くなりました。扱うシステム規模が大きくなってきた所以でもあります。結果、近年の読者の方には、エレクトロニクス創生の頃にあったアナログ回路やデジタル回路技術などの詳細を説明する書籍がたいへん少なくなり、説明不足のお叱りを受けるケースもございました。

●以上のことから、過去多くの好評をいただいた書籍の中から、現代においても十分有用と思われる記事を収録しました書籍に関してのみ、このたび原著作者の許諾を得て、復刻版として発行することいたしました。みなさまにご活用いただけると幸いです。

このPDFは、CQ出版社発売の「新・低周波/高周波回路設計マニュアル[オンデマンド版]」の一部見本です。

内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

内容 <http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/52/52191.htm>

購入方法 <http://www.cqpub.co.jp/order.htm>

……………この本はオンデマンド印刷技術で復刻しました……………

本書は、過去に小社が発行・販売いたしました書籍を光学式スキャナで読み取り、デジタル化したもの、オンデマンド印刷技術によって復刻版として用意したものです。諸々の事情により、一般書籍としての刊行時とは装丁や価格が異なり、印刷が必ずしも明瞭でなかったり、左右頁にズレが生じていることがあります。また、一般書籍最終版を概ねそのまま再現していることから、記載事項や文章に現代とは異なる表現が含まれている場合があります。事情ご賢察のうえ、ご了承くださいませようお願い申し上げます。

見本