

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

実験と波形写真が実証する

確実に動作する電子回路設計

上野大平^[著]

見本

CQ出版社

第1章 OPアンプの基本特性



入力容量の影響

OPアンプの入力端子には、わずかながら容量（キャパシタ成分）が存在します。その値は品種によって異なりますが、普通1pF～5pF程度で、一般的にFET入力型OPアンプのほうが、バイポーラ・トランジスタ入力型より若干大きな値を示します。

いっぽう、OPアンプで実際の回路を構成するときには、必ず±両入力に何らかの配線が接続されます。配線およびさらにそれに接続される部品と他の配線、または部品との間にもこうした容量があります。

これらは一般に浮遊容量（ストレ容量）と呼ばれています。さらに、入力に接続される部品が必然的にもっている内部容量もあります。これらを合成したものが入力容量 C_i となり、OPアンプ回路の利得や位相特性に影響を与えます。

図1-1は、入力容量 C_i によりループ特性に与える影響を示しています。OPアンプに適当な位相補償がされていて、帰還ループが純抵抗で構成されているならば、回路は安定に動作します。

それは、OPアンプの開ループ利得対周波数特性と、入力-出力間位相対周波数特性の図を検討すればわかります。開ループ利得が0dBになる周波数で、入力-出力間の位相遅れが -180° に達しなければ発振せず、安定な動作が可能です。

⊖入力端子と出力端子の間には、周波数に関係なく -180° の一定の位相遅れがはじめからありますから、 $(-180^\circ) + (-180^\circ) = -360^\circ = 0^\circ$ で、このとき利得が1（0dB）以上あれば、正帰還となって発振します。⊖入力端子に C_i があると、適正な位相補償以外に $R_1 \parallel R_2$ と C_i による位相遅れが重なり、発振や不安定動作を招きます。

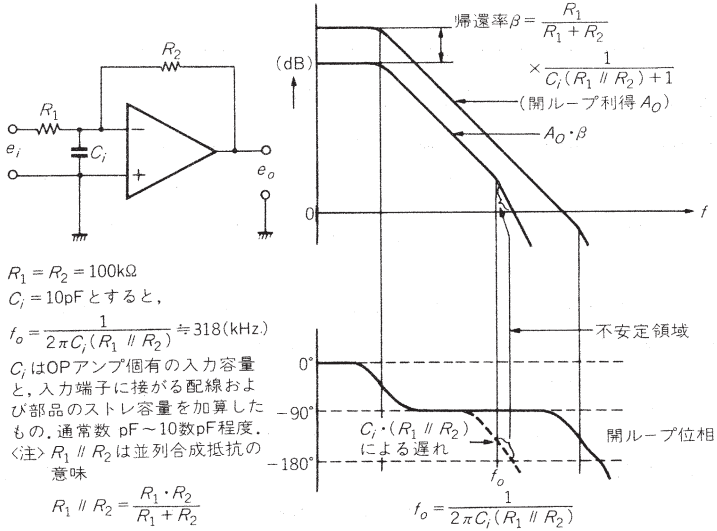
OPアンプ固有の C_i は小さく、 R_1 および R_2 が極端に大きくなければ、発振に至ることはありません。しかし、高域に若干のピークは生じますので、OPアンプの帯域の上限近い周波数信号まで、取り扱う場合は対策を要します。

図1-2は、 C_i による影響を補償する回路です。 C_i によって遅れる位相を C_N によって進

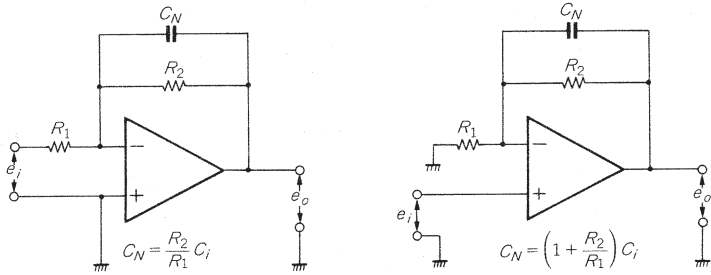
ませる、別の見方をすれば C_i と R_1 および R_2 のため生じる高域のピークを、 C_N と R_2 によって抑えるわけです。 C_N の値の決め方は、

$$C_N = \frac{R_2}{R_1} C_i \dots \dots \dots \text{反転増幅回路}$$

<図 1-1>
入力容量による影響



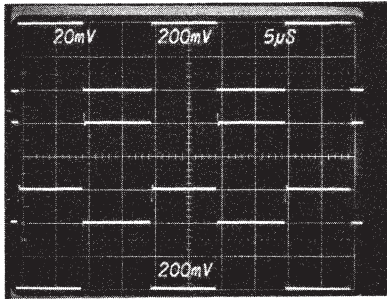
<図 1-2>
入力容量の補償回路



- (1) 反転・非反転とも同じ補償回路である。
- (2) C_i の正確な値が不明なときは、調整が必要である。 R_1, R_2 が $10\text{k}\Omega$ 以下、および電圧フォロワでは C_N は不要ことが多い。
- (3) 容量性トランスジューサなどは、OPアンプ固有の入力容量よりもはるかに大きく、 R_1 と R_2 が比較的低くても、 C_N を必要とする場合もある。
- (4) 入力信号に含まれる周波数成分が $f_o = \frac{1}{2\pi C_i (R_1 \parallel R_2)}$ (Hz) よりも十分低い場合は、この補償は必要ない。
- (5) 実験は LF356 で行った。

$$C_N = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) C_i \dots \dots \dots \text{非反転増幅回路}$$

とします。しかし、 C_i の正確な値は不明なことが多く、実際には入力に100kHz程度のパ

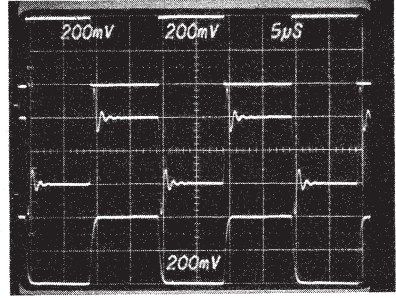


<写真 1-1>

回路は図 1-2 (a)
 $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $G = -1$

- ①入力 e_i
- ②出力 e_o , $C_N = 0$
- ③出力 e_o , $C_N = 3 \text{ pF}$

R_1 および R_2 が10k Ω 程度であれば、 $C_N = 0$ でもほとんど問題ない。わずかのオーバ・シュートが見られる。

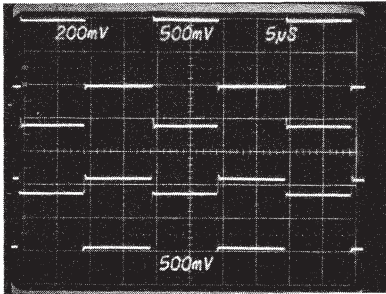


<写真 1-2>

回路は図 1-2 (a)
 $R_1 = R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, $G = -1$

- ①入力 e_i
- ②出力 e_o , $C_N = 0$
- ③出力 e_o , $C_N = 3 \text{ pF}$

R_1 および R_2 が大きいと位相遅れが大きくなり、リングングになる。補償すれば帯域が狭くなって、出力の立ち上がり時間は長くなる。

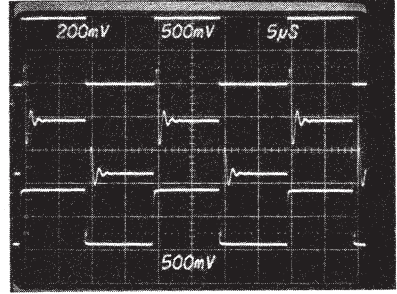


<写真 1-3>

回路は図 1-2 (b)
 $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $G = 2$

- ①入力 e_i
- ②出力 e_o , $C_N = 0$
- ③出力 e_o , $C_N = 6 \text{ pF}$

反転増幅回路とほとんど差がない。この程度ならば、 $C_N = 0$ でも実用上問題ないと思われる。



<写真 1-4>

回路は図 1-2 (b)
 $R_1 = R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, $G = 2$

- ①入力 e_i
- ②出力 e_o , $C_N = 0$
- ③出力 e_o , $C_N = 6 \text{ pF}$

$C_N = 0$ のとき、かなり大きなオーバ・シュートとアンダ・シュートが認められる。 C_N を適当に調整すると完全に補償できる。

ルス信号を加えて、出力波形のオーバ・シュートやリングングが最小になる点に C_N を調整します。通常 C_N の値は数pFですから、小型のトリマ・コンデンサで簡単に調整できます。

写真1-1～写真1-4に図1-2の回路における R_1 , R_2 , G の各定数に対する各種波形写真を示します。

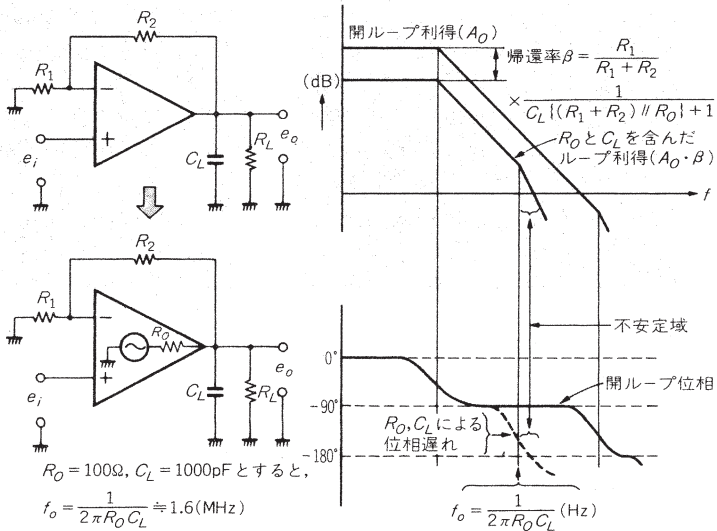
容量負荷の影響

一般に、OPアンプ出力に大きな容量をつなぐと、発振を起こしたり、発振に至らなくてもリングングや、高周波雑音を発生したりすることが知られています。OPアンプの開ループ出力抵抗は100Ω程度あり、これと負荷になる容量によって遅れを生じます。

開ループ出力抵抗は、OPアンプの種類によって異なり、また負荷容量の値はさまざまですから、発振するかしないかは、それぞれ条件によって違ってきます(図1-3)。

OPアンプのデータ・シートには、許される負荷容量の最大値が示されていることもあります。例えば、LF356には0.01μFの負荷まで問題ないと明示されています。これはOPアンプの出力回路に直接保護抵抗を入れていない、新しい出力回路を使ったため可能になったもので、普通は1000pFくらいで見事に発振します。大容量負荷を可能にしたLF356

<図1-3>
容量負荷による影響

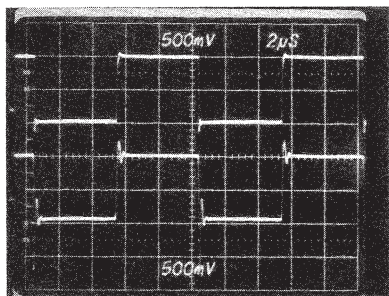


と、一般的なTL080における負荷容量による影響を、写真1-5～写真1-8に示します。

次に補償方法について考えてみましょう。

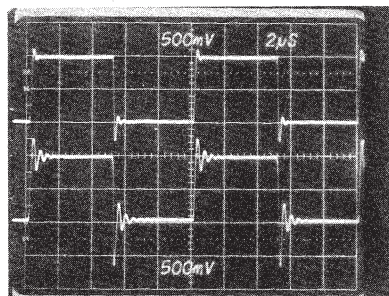
0.01 μ FまでOKのはずのLF356でも、1000pFの負荷で写真1-9に見られるような歪を発生します。連続発振はしないものの、やはり影響は顕著に現れています。TL080では、たしかにLF356より不安定で、リングングや連続発振がより強く見られます。

大きな容量性負荷は、このように不安定要素となりますから、なるべくなら小さな容量になるよう、負荷回路を設計します。どうしても避けられない場合は、図1-4のような



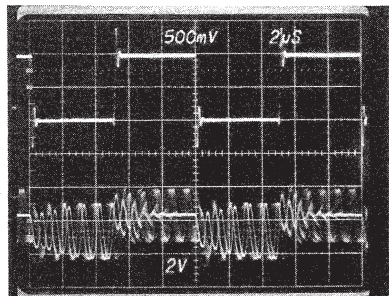
<写真1-5>

OPアンプはLF356
回路は図1-4(a)
入力は100 kHz 1V_{P-P}
 $C_N=0$
① $C_L=100$ pF
② $C_L=1000$ pF



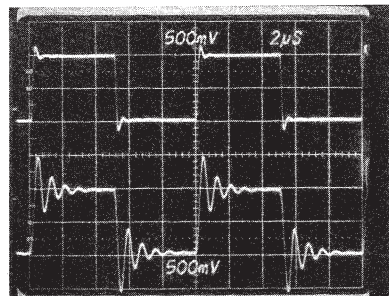
<写真1-6>

OPアンプはLF356
回路は図1-4(b)
入力は100 kHz 1V_{P-P}
 $C_N=0$
① $C_L=100$ pF
② $C_L=1000$ pF



<写真1-7>

OPアンプはTL080
回路は図1-4(a)
入力は100 kHz 1V_{P-P}
 $C_N=0$
① $C_L=100$ pF
② $C_L=1000$ pF



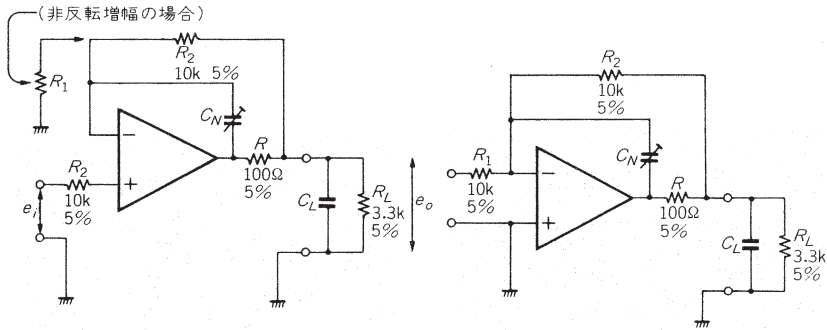
<写真1-8>

OPアンプはTL080
回路は図1-4(b)
入力は100 kHz 1V_{P-P}
 $C_N=0$
① $C_L=100$ pF
② $C_L=1000$ pF

補償回路を用います。

この回路は、不安定原因となる位相遅れを起こすOPアンプの内部出力抵抗を、OPアン

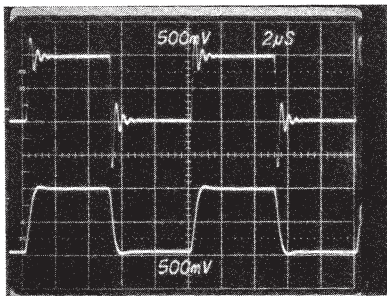
<図1-4> 補償回路



(a) 電圧フォロワまたは非反転増幅回路
(実験と写真撮影は電圧フォロワ)

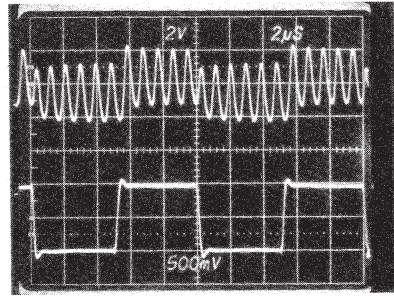
(b) 反転増幅回路

- (1) $R = 50 \sim 200\Omega$
実験回路は 100Ω
〔閉ループでは
 $\frac{R_O + R}{R_O + R} = r_o$ となり
出力インピーダンスにはほとんど影響しない〕
- (2) C_N の値は、OPアンプの種類と C_L の値によって調整する(10pF~300pF程度)。可変コンデンサが調整には便利だが値がきまれば固定コンデンサでよい。なお、 C_N の簡単な計算式はない。
- (3) 写真撮影時の R_L は $3.3k\Omega$



<写真1-9>

- OPアンプはLF356
- 回路は図1-4(b)
- 入力は100kHz 1V_{P-P}
- $C_L = 1000\text{pF}$
- ① $C_N = 0$
- ② $C_N = 22\text{pF}$



<写真1-10>

- OPアンプはTL080
- 回路は図1-4(a)
- 入力は100kHz 1V_{P-P}
- $C_L = 1000\text{pF}$
- ① $C_N = 0$
- ② $C_N = 270\text{pF}$

プの外に半分引っぱり出したようなものです。Rによって C_L とOPアンプ出力端子を分離して、ここから C_N で \ominus 入力側に帰還します。C_Nによる帰還ループは、R₂による帰還ループより位相的に進んでいますから、C_Lによる遅れを補償する方向に働きます。

C_Nの値は、簡単に求める式がありません。OPアンプの種類やC_Lの値によって、また周囲の帰還回路によっても最適値が変化します。回路入力にパルスを加えて、出力波形を見ながら、一番すなおな波形になるように調整します。大略のめやすとしては、100～300pF程度で、OPアンプによってはこれより低い値で最適となる種類もあります。写真1-9と写真1-10に補償を施したときの波形を示します。



スルーレートの影響

●スルーレートとは何か

OPアンプの規格表には、必ずスルーレートの記載があります。これはOPアンプの出力端子電圧が単位時間にどれだけ変化し得るかの規定です。単位時間には1 μ sを使い、1 μ sの間に变化する電圧をVで現し、V/ μ sの単位を用います。

スルーレートと利得帯域幅の間にはかなり関連が存在しますが、それぞれを決定する要素は本質的に異なります。ただ、一般論としては利得帯域幅とスルーレートは相関があり、広帯域のOPアンプは高速度（高スルーレート）であるといっても、大きな間違いはありません。

それでは、何がスルーレートを制限する原因なのでしょう。最大かつほとんど唯一の要素は、OPアンプに必ず施される位相補償にあります。

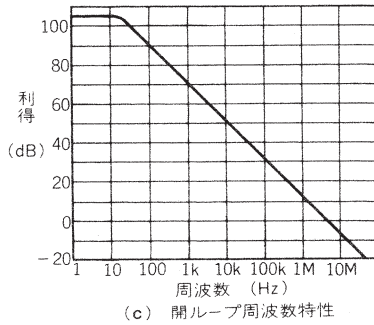
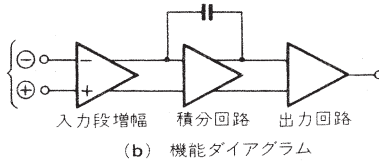
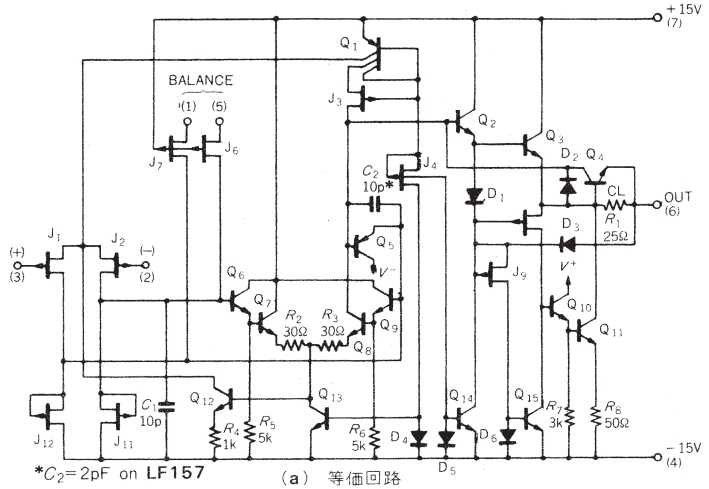
図1-5(a)は、本稿で実験に使用したLF356の等価回路です。同図(b)は、これをさらに機能分離した、LF356内部のブロック・ダイアグラムです。この図でも示すとおり、「周波数補償」回路は積分回路であって、何よりの証拠が図1-5(c)です。10数Hzから直線(-6dB/oct)で下降する利得-周波数特性は、積分回路としての大きな特徴です。

●スルーレートを測定してみる

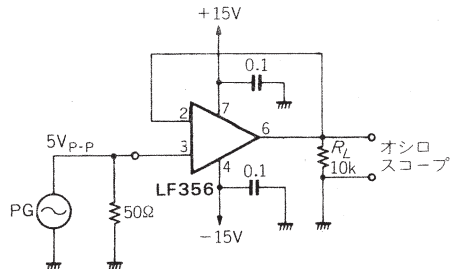
図1-6および写真1-11は、LF356のスルーレートを実測した方法と結果です。

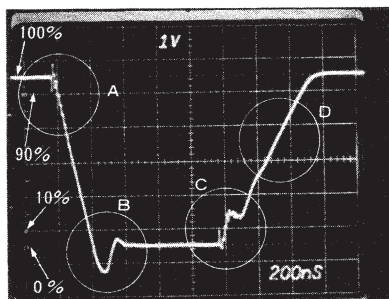
このOPアンプは、補償コンデンサを内蔵したのですが、外付け型（例えばLM301など）でも電圧フォロワ回路は、スルーレートが一番遅くなる可能性の高い回路です。それは、この回路は利得0dB、つまり全帰還回路のため、完全な位相補償が必要であるからです。

〈図1-5〉
LF356の回路構成と
閉ループ特性



〈図1-6〉 実測回路





<写真 1-11>

(1)立ち上がりとしち下がりですルーレートは異なる。その原因は、補償回路部分が完全な積分回路ではなく、充電と放電では特性が違うため。

(2)④階段状の波形は原因不明。

③入力容量と負荷容量によるピーク。

⑤出力が応答する前に入力部がすでに飽和している。出力上昇とともに負帰還回路が形成される。

⑥この部分の傾斜をスルーレートと呼ぶ。

(3)オシロスコープの垂直アンプのスルーレートも加算される。写真のオシロスコープは約400V/μsで無視できる。

(4)入力パルスの立ち上がりおよび立ち下がり時間は5V/10ns(500V/μs)

他の種のOPアンプも同様に測定できますが、スルーレートに関しては、どのOPアンプもはっきりした数字を規定しています。

したがって、それを基準に設計すれば良く、実測する必然性はあまりないと思われるからです。

●スルーレートの改善方法

外部に補償コンデンサを付ける型式のOPアンプでは、スルーレートを規格より速くすることも可能です。図1-7は、その方法を示したものです。しかし、筆者は高速応答の必要な部分には、高速OPアンプを使用するほうが、このような手段を用いるより結果的に良い方法と考えています。それ故、本稿の具体回路例には一切これらの高速化手法は使用していません。

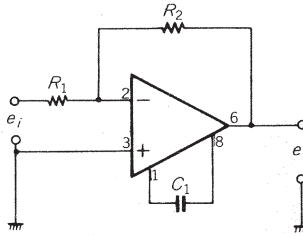
ただ、入手可能なOPアンプの性能より、さらに高速応答が必要であれば、やむを得ないことです。

●出力波形とスルーレートの関係

パルス波出力を得る回路では、パルスの繰り返し周波数に関係なく、スルーレートそのものが立ち上がりおよび立ち下がり時間を制限します。三角波では、上昇と下降の傾き(変化率)がスルーレートを越えられないことは明らかです。正弦波では、連続的に傾きが変わりますから、最大傾斜がスルーレート以下でなくてはなりません。

いずれにしても、スルーレートはV/μsの単位です。歪なく出力できる限界値は、波形と振幅の関数になる点に注意する必要があります。正弦波のピーク電圧を E_p とすれば、最大傾斜 $=2\pi f E_p$ [V/sec] です。使用するOPアンプは、この値より高速でなければなりません。

<図1-7>
外部補償回路
(LM301の例)

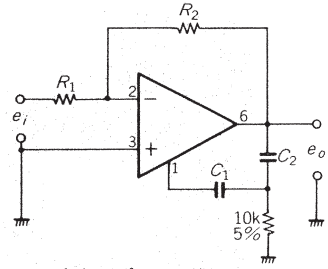


(a) シングル・ポール補償回路

* 基本的補償方式だが、設計閉ループ利得によって C_1 を増減できる。

$$C_1 \geq \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times 30(\text{pF})$$

(高利得にするほど高速になる)

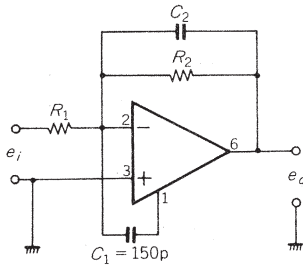


(b) 2ポール補償回路

* 高域の開ループ利得を増強する。ややオーバーシュートが出る。

$$C_1 \geq \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times 30(\text{pF})$$

$$C_2 = 10C_1$$



(c) フィード・フォワード補償回路

* 高域は C_1 でバイパスさせて補償は C_2 で行う。
(a) に比べて10倍位速くなる

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_o R_2} \quad (f_o = 3\text{MHz})$$

OPアンプ回路の歪率

●実験の目的

オーディオ回路を専門にしている人は、どうもOPアンプが好きではないようで、これがいわゆるマニアになると極端に嫌うようになるのはなぜでしょうか。いわく、音が硬い、いわく音が濁る等々、OPアンプには罵詈雑言のあらん限りが浴びせられます。その筋の専門誌などではいろいろと実験を含めて報告がされていますが、いずれにせよあの歪のカ

ISBN978-4-7898-5216-6

C3055 ¥2600E

CQ出版社

定価：本体2,600円(税別)



9784789852166



1923055026001

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、少部数での印刷・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「確実に動作する電子回路設計[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/52/52161.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、デジタル化したのち、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