

第 1 章

【成功のかぎ1】 電源回路設計の概要 2種類の電源回路設計法をマスターしよう

電子機器は、電気エネルギーを消費して必要な仕事をを行います。電源回路は電子機器内部で、商用交流電源や電池などから入力された電気エネルギーを、電子回路が要求する形態の電気エネルギーに変換して供給しています。電源回路を一言で言えばエネルギー変換回路です。

直流安定化電源のエネルギー変換には、2種類の回路方式があります。すなわち、余分なエネルギーを熱に変えるリニア・レギュレータと、エネルギーの形態を変えて熱を出さないスイッチング・レギュレータです。リニア・レギュレータはほとんどノイズを出しませんが、スイッチング・レギュレータはスイッチングによるエネルギー変換のときに大きなノイズを出す可能性があります。

本章では、負荷の特性に応じた電源回路の選びかたや、電源回路のトレンドについて概観します。

1-1

電源回路が正常に動いて初めて機能が実現できる

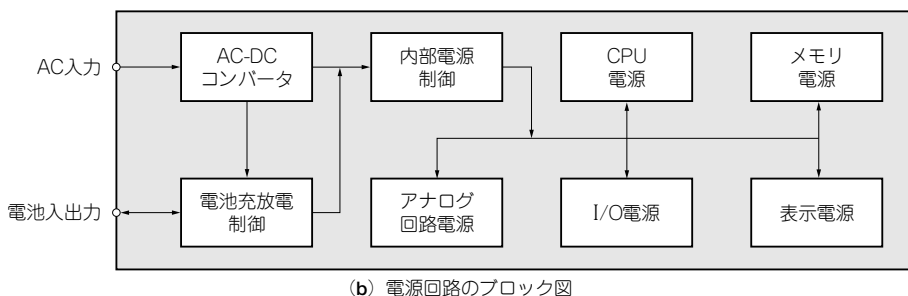
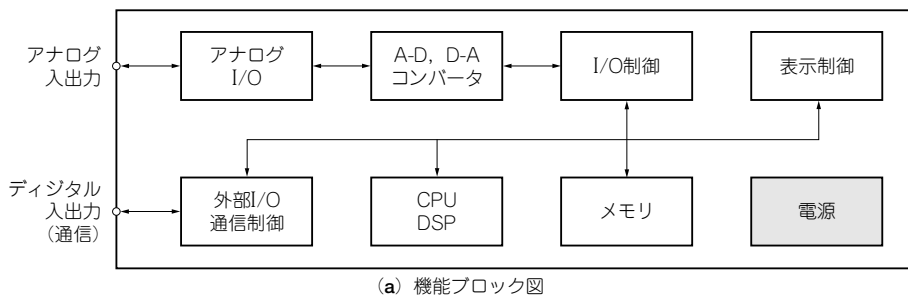
電子機器を信号を中心に書いたブロック図は、例えば図1-1(a)のようになります。これを電源を中心に書き直すと図1-1(b)になります。

電子回路を機能で見るときは電源を無視する場合がありますが、この場合でも、電源は正常に動作していることが前提となります。

トラブル・シューティングのときに、電源は正常に動作していると思いこんでしまったところ、不具合の原因が電源にあったために原因究明に思わぬ時間がかかった、という経験は、誰でももっているのではないのでしょうか。

信号は「神経系統」、電源は「血液循環」ですから、第一に正常な電源供給を実現して、信号の伝達はその後にチェックする習慣を身につけたいものです。

見本



【図1-1⁽²⁰⁾】電子機器の構成は機能と電源供給という二つの面から考えることができる

最近の電子機器では機能ブロックごとに必要な電源電圧が異なることが多い、電源の立ち上がり/立ち下りの仕様が決められている(シーケンスという)ことも増えている

1-2 出力電圧が安定化された電源回路の作りかたを解説する

● 昔の電源回路は安定化されていない回路が多かった

真空管時代の電源回路は、一部の精密計測機器を除けば、安定化電源を使用していませんでした。

商用交流電源にトランスを接続して絶縁/変圧し、トランス2次側の交流電圧を整流/平滑しただけの、安定化されていない直流電源が一般的でした。

● 今は一定の電圧を出力する安定化電源が一般的

能動素子として真空管に代わり半導体が使用されるようになると、真空管ほどには耐圧に余裕がなくなり、安定化電源を用いることが多くなりました。

直流安定化電源回路は、直流出力電圧を一定の値に制御します。出力電圧の変動要因としては、入力電圧、負荷電流、周囲温度があります。

これらの変動要因を抑え込んで常に一定の直流出力電圧を得るのが、直流安定化

見本

電源回路です。

● 安定化電源を使うメリット

すべての電子回路に安定化電源が必要かといえば、そんなことはありません。

安定化電源回路そのものも電子回路であり、安定化されていない直流電源で動作し、出力として安定な直流電圧を機能を実現するための回路に供給します。

それでは、安定化電源を使うメリットは何でしょうか。

▶ 機能を実現しつつ電源変動に耐えるのは大変

機能を実現するための回路を変動の大きい非安定化直流電源で動作させようとすると、耐圧と消費電力に余裕のある半導体の使用が必要です。

そのような半導体は形状が大きく、高価になります。現在、主流になっているCMOS型ICを考えた場合、損失は電源電圧の自乗と動作周波数に比例するため、高速動作もさせにくくなります。

▶ 電源変動への対応と機能の実現を分離すると楽

電子機器を安く、小さく作ろうとするなら、機能を実現するための回路に、耐圧に余裕はないけれども安く小さい半導体を使いたくなります。そのためには、電源の変動ぶんは安定化電源回路に負担させればよいのです。

こうすれば、ICの電源電圧を下げて、低消費電力で高速に本来の仕事を行わせることもできます。

要するに、分業化による半導体の利用効率アップを目的にしているわけです。

これが、安定化電源回路を使う理由です。さらに、安定化電源回路にもできるだけ内部損失の少ない回路を使用すれば、装置全体が安く、小さくできます。

● 電源電圧を安定化しないとどうなるか

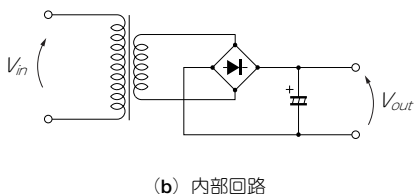
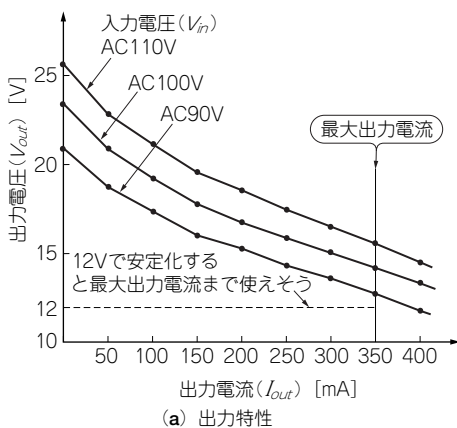
出力電圧が安定化されていない電源の例として、定格出力DC 15V/350mAの非安定化出力ACアダプタの出力特性を図1-2に示します。

出力電圧は、入力電圧や出力電流の変動で大幅に変化します。公称出力電圧値の15Vは、実測では入力電圧AC 100Vで出力電流DC 300mAのときに得られます。

図1-2を見て、定格値がDC 15V/350mAであることがわかるのは、専門家だけでしょう。

これはたまたま手元にあった一例ですが、非安定化出力ACアダプタはこのように出力特性が悪いものが一般的です。

見本



【図1-2】 電圧が安定化されていないACアダプタの例
最近では定電圧出力のACアダプタも多い

▶ 電源電圧変動が大きいとディジタル回路は設計しにくい

ディジタルICの代表例として74HCシリーズと呼ばれるICを例にとり、このような非安定化電源で動作させられるかを考えてみましょう。

74HCシリーズの推奨電源電圧は、2.0～6.0Vです。定格出力電圧がDC 3.5V くらいのACアダプタを考えると、電源電圧変動範囲は3～6V程度と予想され、どうにか動くかもしれません。

しかし、74HCシリーズは電源電圧により動作速度が変わってしまいます。動作速度を問題にするようなきちんとした設計はできません。安定化電源を使用するのが設計の面では効率的です。

▶ アナログ回路でも電源電圧変動への対応は難しい

アナログ回路の場合、単電源のOPアンプ回路であれば、図1-2に示した程度の変動を許容できる設計は可能です。しかし、電源変動の影響を受けないように動作させるには、工夫が必要です。

また、このACアダプタを2個用意して、±電源のOPアンプ回路の電源とすることを考えてみましょう。

一般的なOPアンプの最大定格は電源電圧±18V程度です。ところが、このACアダプタによる電源を使うと、入力電圧変動も含めた最大電源電圧は±25V以上になります。そのままではOPアンプは使用できず、安定化電源回路が必要です。

ダイオード半導体を使用して回路を工夫すれば、安定化電源回路なしで動作

見本

するOPアンプ回路も実現可能です。しかし、開発に時間がかかるだけでなく、コストも上昇します。

やはり、安定化電源 + OPアンプICという構成が、すべての面で最も効率的です。

1-3

直流を使う2種類の電源回路を中心に扱う

● 安定化電源と一口にいても種類は多い

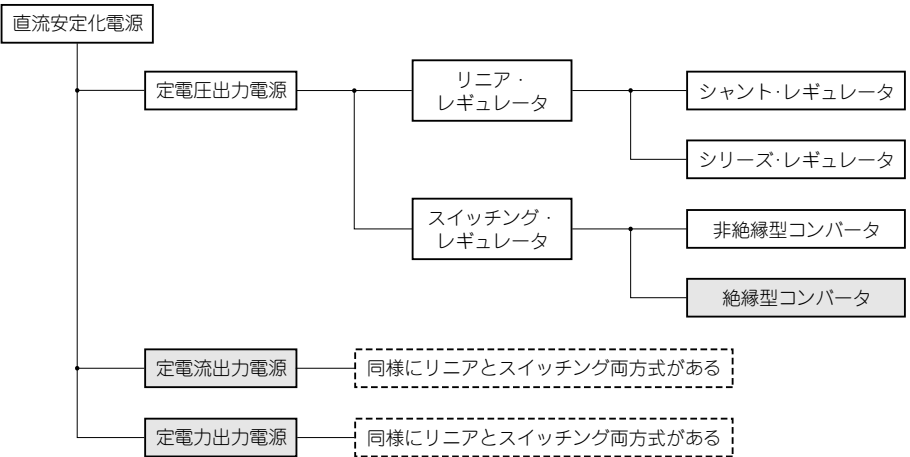
安定化電源の回路方式を大別すると、出力を連続的に安定化するリニア・レギュレータと、スイッチングを用いて不連続的に安定化するスイッチング・レギュレータがあります。

最近では、小型化/低価格化の要求からほとんどの電子機器にスイッチング・レギュレータが採用されるようになりました。

● 出力電圧を安定化する電源を扱う

直流安定化電源には、出力電圧を安定化する定電圧電源以外にも出力電流を安定化する定電流電源、出力電力を安定化する定電力電源があります(図1-3)。

定電流出力や定電力出力の直流安定化電源回路は、使用頻度が少ないので、本書では触れません。



【図1-3】 直流安定化電源の種類

見本

AC100Vなど商用交流電源でよく使用されるのは、スイッチング・レギュレータとシリーズ・レギュレータ

● リニア・レギュレータと非絶縁型スイッチング・レギュレータを中心に扱う

図1-3に示すように、スイッチング・レギュレータには、入出力間が絶縁されていない非絶縁型とトランスを用いて絶縁した絶縁型の2種類があります。

絶縁型スイッチング・レギュレータは、商用交流電源に直結されるものが多くあります。

その場合、出力は交流電源ラインから絶縁され、安全性が確保されることから、オフライン・コンバータ、あるいは入力整流回路を含めてAC-DCコンバータと呼ばれます。

そのような絶縁型スイッチング・レギュレータは、高周波絶縁トランスに標準品がなくて入手しにくいこと、安全規格上の配慮が必要で危険を伴うことから、本書では解説にとどめて製作はしません。

本書では、安全に実験できるリニア・レギュレータと非絶縁型のスイッチング・レギュレータ(DC-DCコンバータ)の2種類を主に取り上げます。

実験により動作を確認しながら、使用頻度の多いこの2種類の定電圧電源回路を設計/製作/使用するための基本知識の習得を目指します。

1-4

実用的な電源システムを設計するには

● AC 100V入力電源回路は購入してくる

エネルギー源である商用交流電源(AC 100Vなど)を入力とするAC-DCコンバータを自分で設計できないと、真に実用的な電源システムは作れないのではないか、と思われるかもしれません。その心配は無用です。

最近では「中間バス・アーキテクチャ」(IBA: Intermediate Bus Architecture)(図1-4)と呼ばれる電源システムの採用が増えてきました。このシステムでは、AC-DCコンバータを設計する必要がありません。設計や製作が面倒なAC-DCコンバータは、安全規格やノイズ(EMC)規格を取得した製品を外部より購入します。

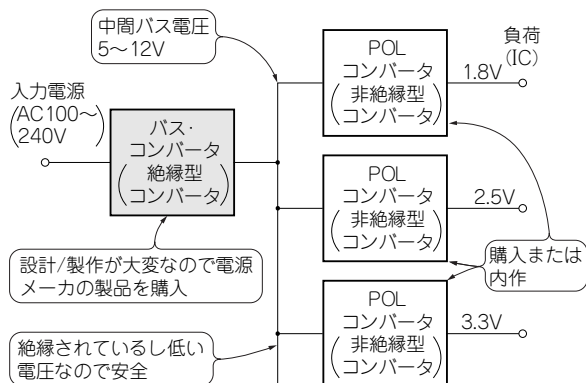
● 直流電圧から直流電圧を作る回路だけを設計する

2次側の直流電圧(中間バス電圧と呼ぶ)は、安全で扱いやすい5～12V程度にします。

ICなどの直近に、中間バス電圧を必要な電圧に変換する^{ボルト}POL(Point Of Load)と呼ぶDC-DCコンバータやリニア・レギュレータを配置します。

このようにすると、必要な電源がすべて入った高価な多出力電源ユニットを特注

見本



【図1-4】 中間バス・アーキテクチャと呼ばれる電源システムの概要
さまざまな電源電圧が必要な最近の電子機器に向いている

で購入する必要がなく、負荷となる電子回路にマッチした安価で高効率な電源システムの構築が可能です。

最近のデジタルICは、昔のように5Vだけではなく、3.3Vや2.5Vなど複数の電圧を要求することが多いので、このような構成のほうが便利です。

本書では実用的な電源システムを作るために、DC-DCコンバータやリニア・レギュレータについて実験しながら基本知識の習得を目指します。

実験のときは、基本的に直流電源を使用します。ここでいう直流電源とは、実験用のベンチ・トップ型で、絶縁トランス、整流/平滑回路、リニア・レギュレータを組み合わせた高性能なものを指します。

1-5 電源回路の設計時には負荷の性質も考える必要がある

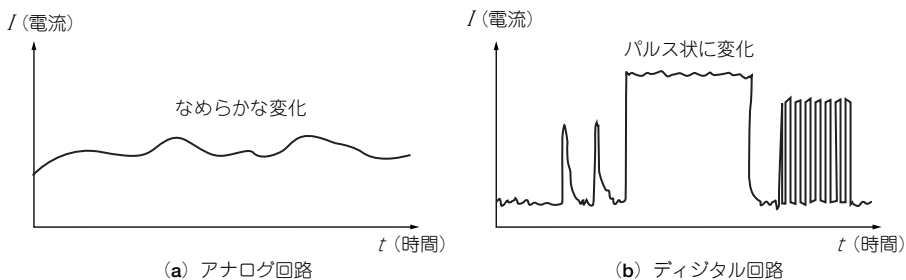
● デジタル回路とアナログ回路は電源回路が供給しなければならない電流の波形が大きく異なる

本書で負荷として想定するのは電子回路ですが、デジタル回路とアナログ回路では電源が供給しなければならない電流の波形がかなり異なります(図1-5)。

アナログ回路ではゆっくりと電流が変化することが多く、デジタル回路は不規則なパルス状の電流が流れます。

デジタル回路のパルス性の負荷電流変化に対して、電源回路の能動素子は応答できない場合がほとんどです。どうして応答できるのかというと、出力に入れたコンデンサが電荷を充放電するからです。

見本



〔図1-5〕 電源回路が供給しなければならない電流波形

デジタル回路が消費するパルス状の電流に対応するためには適切な出力コンデンサが重要

● 設計時点で十分に考慮する必要がある負荷

一般に要注意負荷として警戒されているのが、

- (1) コンデンサ負荷
- (2) ランプ負荷
- (3) モータ負荷
- (4) インダクタ負荷
- (5) DC-DC コンバータ

などです(図1-6)。

(1), (2), (3)は、電源ON時の突入電流が大きすぎて、過電流保護回路の設計によっては電源回路(およびそれ以後の回路)が起動しません。

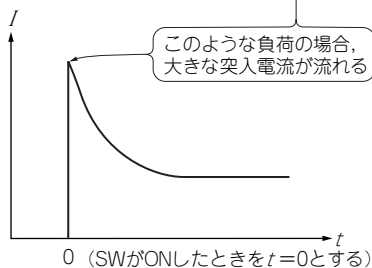
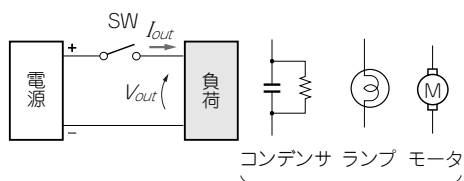
(1)は、電源回路の入力側をOFFしたときに、出力と入力の電圧が逆転してしまい、保護ダイオードがないと破損する可能性が高い負荷です。

(3)と(4)は、電源回路の入力側をOFFしたときに、逆起電力が発生して、保護ダイオードがないとほとんどの場合に電源回路が破損します。

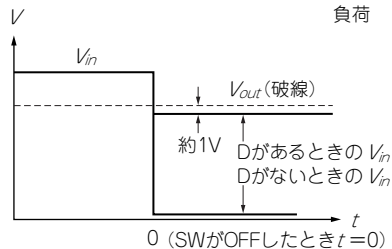
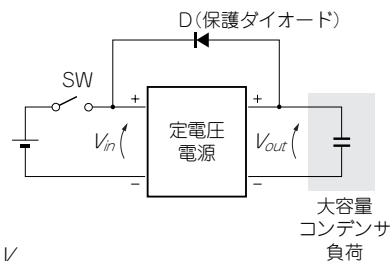
(5)は、高効率なスイッチング・タイプのDC-DCコンバータが出てきて問題になってきました。

DC-DCコンバータは負荷が一定なら入力電力もほぼ一定です。そのDC-DCコンバータを負荷とする電源回路から見ると、出力電力が一定になります。電源回路の出力電圧が増加すると、出力電流は減少することになるので、これは負性抵抗特性を示します。回路が負性抵抗を含んでいると発振しやすくなり、安定度の確保が難しくなります。

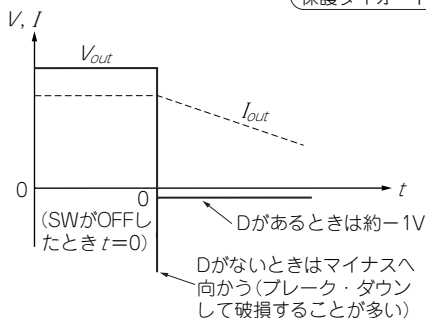
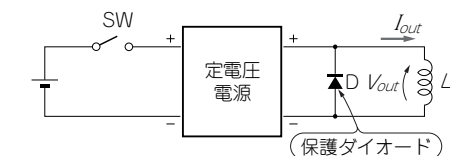
見本



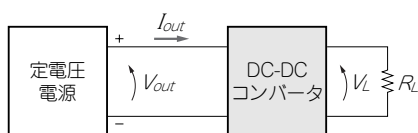
(a) 電源ON直後に大きな電流が流れる



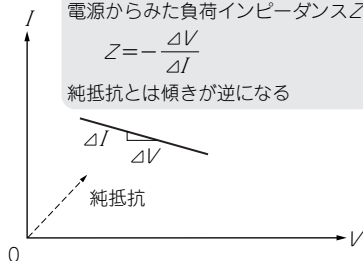
(b) 入出力電圧が逆になる負荷



(c) 誘導起電力により出力電圧が異常になる



仮にDC-DCコンバータの効率が100%なら
 $V_{out}I_{out} = V_L^2/R_L$ (一定)
 電源からみた負荷インピーダンスZは、
 $Z = -\frac{\Delta V}{\Delta I}$
 純抵抗とは傾きが逆になる



(d) 負性抵抗により定電圧出力動作が不安定になる

【図 1-6】 負荷によって発生する危険な事態がいくつかある

保護用ダイオードや適切な設計の電流制限回路など、電源回路に対策をしておく必要がある

見本

● 低電圧大電流化の流れ

負荷となる電子回路に使用されるICは微細化が進み、電源電圧も1V近辺に低下しています。それにつれて、電流が増加してきました。

例えば同じ10Wの負荷でも、5V/2Aが1V/10Aになると、設計や製作の難易度が大幅に上がります。

電源電圧の許容変動範囲を $\pm 5\%$ とすると、5Vでは $\pm 0.25\text{V}$ ですが、1Vでは $\pm 0.05\text{V}$ となります。そのうえに電流が増加しているため、配線パターンでの電圧降下も無視できません。

▶ デジタルICが必要とする電源の例

表1-1にサーバ用CPU（インテル社製Xeonプロセッサ）の電源電圧／電流の要求仕様を示します。

省エネルギーのために、動作に応じて内部回路はダイナミックにON/OFFされます。入力電流も、最大100Aステップと短時間（1 μs 以内）に変化します。100Aステップで電流が変化しても、許される電圧変動は $-140\text{mV} \pm 20\text{mV}$ です。

この要求仕様を実現するには、効率、形状、コストの面でリニア・レギュレータが受け入れられないので、スイッチング・レギュレータ（降圧型コンバータ）が使用されています。

▶ 複数の回路を並列で動かして負担を分散

スイッチング・レギュレータが1回路だけでは、図1-7(a)のように120Aの電流を1回路だけで流す必要があります。プリント基板の銅箔も含めて、回路素子に加わる負担が大きすぎます。

そこで、数回路を多相（マルチ・フェーズ）化し、1回路の電流を回路数分の1として負担を低減しています。一例として図1-7(b)に12V入力から1.2V/120Aを取り出す4相降圧型コンバータを示します。

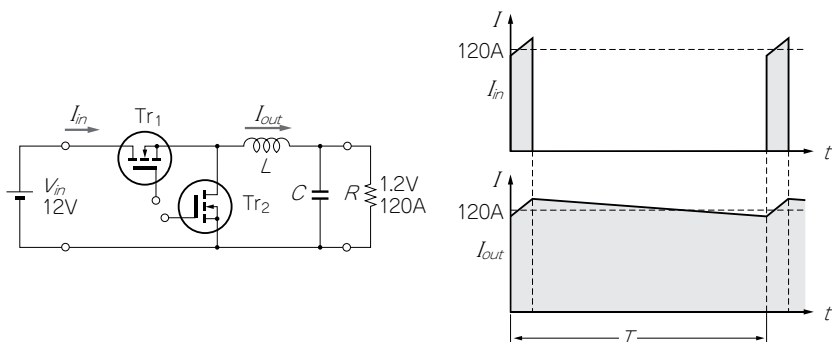
多相化して小さくなるのは1回路の出力電流だけではありません。単相では入力

[表1-1⁽⁹³⁾] インテルXeonプロセッサが電源に要求する仕様

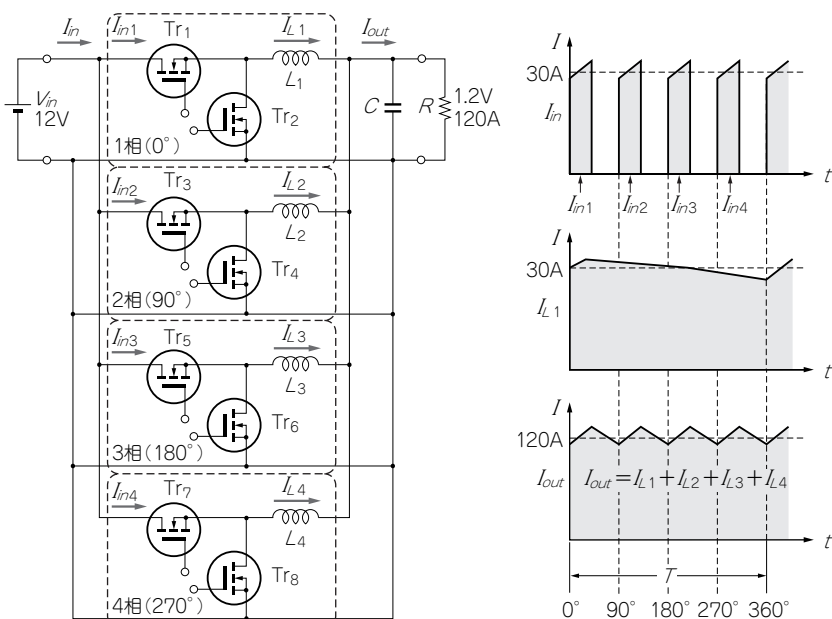
直流入力電圧	直流出力電圧	直流出力電流	最大出力電流	最大出力電流 ステップ	最大出力電流 スルー・レート
12V	0.8375V～1.6000V 6ビットで設定	105A	120A	100A/ μs	930A/ μs

見本

電源に加わるストレスも約120Aピークと大きくなっていますが，4相では約30Aピークと小さくなります。



(a) 単相降圧型コンバータ
回路素子だけでなく、入力電源のストレスも大きい



(b) 4相降圧型コンバータ
回路素子や入力電源に対するストレスはどちらも1/4になる



図1-7 低電圧大電流を必要とする負荷に対応するため多相化された電源が使われている

● 中間バス電圧を使いIC直近で必要な電圧を作る

サーバやパソコン用CPUほどには大電力を必要としない回路においても、使用ICの電源が低電圧/大電流になっていて、しかもICごとに必要な電源電圧が異なっています。

これに対応するため、前述の中間バス・アーキテクチャ(図1-4)を採用する場合が増えてきました。

バス電圧には、最終的に必要な電圧よりある程度高く、かつ扱うのに危険がないよう、絶縁された5～12V程度の電圧を使います。電圧を高くしたぶん、伝送ラインに流れる電流を減らすことができます。

ICの直近で必要な低電圧/大電流に変換することにより、配線による電圧降下を低減し、効率を改善します。ICの直近で必要な電圧に変換するコンバータは前述のようにPOLと呼ばれています。

● 携帯機器でもスイッチング方式が増えている

小型携帯機器では何種類も必要な電源電圧を小型に作るため、必要部品数の少ないLDO (Low DropOut regulator)と呼ばれる低損失リニア・レギュレータが使用されることが多いのですが、充電電池の連続使用時間を延ばすためには効率を高くする必要があります。スイッチング・レギュレータの使用が増えてきました。

電源の投入/遮断順序が規定される場合も多く、電源ICにON/OFF制御端子付きを使用し、外部で電源投入/遮断の順序を制御することもあります。

● スイッチング周波数が高くなっている

小型化と高速なエネルギー供給の必要からスイッチング周波数もMHzを越えてきています。

MHzでスイッチングする回路には専用基板が必要になり、ブレッド・ボードでは簡単に実験できません。

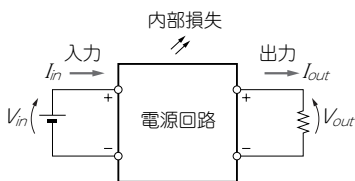
本書の実験は100kHz程度の周波数で行います。基本となる事柄は実験しながら考察します。

1-7

理想の電源回路とは

電源回路はエネルギー変換回路です。目に見える機能はなく、必要なれば存在させておきたい回路です。よって、電源回路への要求は言葉で書くなら簡単です。





効率 η は、入力電力を P_{in} [W]、出力電力を P_{out} [W]として、

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} I_{out}}{V_{in} I_{in}} \dots\dots\dots (1-1)$$
 となる。ここで、内部損失 P_D [W]を考えると、

$$P_D = P_{in} - P_{out}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_D + P_{out}}$$

〔図1-8〕 電源回路の効率と内部損失
 内部損失はすべて熱となる

- (1) 効率100%
- (2) 雑音は発生しない
- (3) 高安定で出力の変動ゼロ
- (4) 無視できるほど小形
- (5) 価格ゼロ円

残念ながらこの要求を満たすことはできませんが、設計/製作する場合には、この要求にできるだけ近づけるようにします。

従来、直流安定化電源は、デジタル回路用の5V、アナログ回路用の $\pm 15V$ 、メカ制御用の24Vを用意する程度のものが一般的でした。

最近の電源は、上述のように出力電圧も多様化し、しかも、電源に用意されるスペースは大幅に減少しています。効率を向上させて、必要な放熱面積を減らすことが重要です。

1-8	電源回路の重要な特性「効率」
------------	-----------------------

効率は図1-8の式(1-1)で定義されます。

電源回路をブラックボックスとして見る場合には、効率は重要なファクタですが、実際に電源を設計/製作する場合には、効率よりも内部損失を考慮することが重要です。効率の改善は、内部損失を低減した結果だからです。

電源回路各部の損失を計算/測定し、その原因を考察し、低減させる方法を考え、実験/計算で確認します。その結果として効率の向上が得られます。

さらに、発生した内部損失をどのように処理すれば内部温度上昇を低減できるのかを常に考えることも非常に大切です。

実際の電源で効率がどの程度になるかという概略を表1-2にまとめました。スイッチングレギュレータは最近のパワー MOSFETを使用したものは高効率です。



[表 1-2] 5V を出力する電源回路の効率

品種	リニア・レギュレータ			スイッチング・レギュレータ	
	入出力電位差 0.5V	入出力電位差 2V	入出力電位差 4V	バイポーラ・トランジスタ	パワー MOSFET
効率	91%	71%	56%	60%～80%	70%～95%

が、バイポーラ・トランジスタを使用したものは90%以上の効率を得ることが困難です。

リニア・レギュレータも、LDO型ならば入出力電圧差が少ないときにはスイッチング・レギュレータ並みの効率になります。

1-9

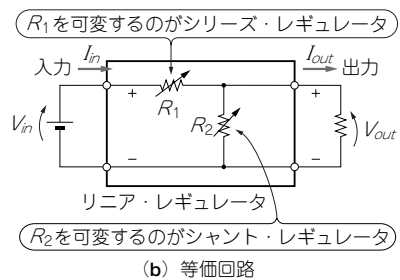
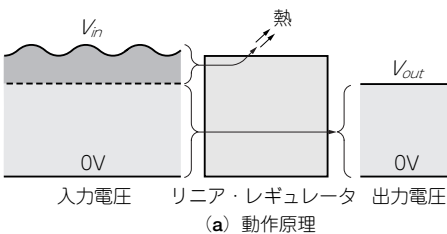
直流安定化電源設計の第一歩は方式の選択

図1-3に示したように、直流安定化電源には、内部動作から分類すると、リニア・レギュレータとスイッチング・レギュレータの二つの方式があります。

● スwitchング・レギュレータとリニア・レギュレータの使い分け

図1-4に示した電子機器の電源のように、商用の交流電源(100～240V, 50/60Hz)に接続される場合は、まず絶縁型スイッチング・レギュレータにより、商用電源から絶縁された何種類かの直流電源を作ります。その後で、必要に応じて、得られた直流電源をそのまま使用したり、あるいは電圧変換して使います。

本書で扱うリニア・レギュレータとDC-DCコンバータの2種類は、どちらもこの電圧変換のためのものです。



[図 1-9] リニア・レギュレータの動作原理

$V_{in}I_{in} - V_{out}I_{out}$ の内部損失がすべて熱になる

見本

低ノイズの電源が必要なアナログ回路にはリニア・レギュレータ，大電流が必要な回路にはスイッチング・レギュレータを使用するのが一般的な使い分けです。

▶小電流だと単純にどちらが良いとはいえない

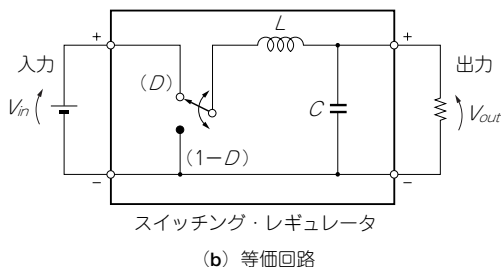
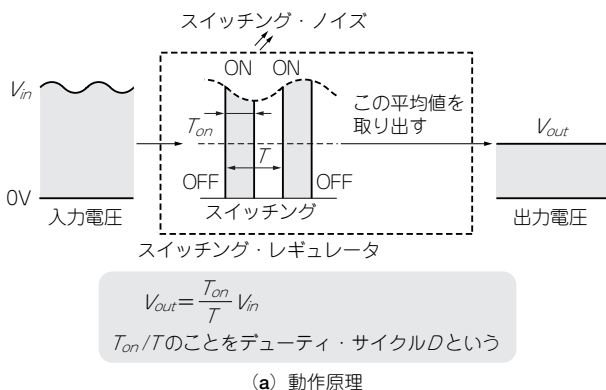
1A以下の小電流回路では，単純にどちらを使うべきとはいえません。損失，コスト，形状，性能など，総合的に考えて最もバランスの良い方法を選択します。

入出力間電圧差が小さいと，総合的に見てリニア・レギュレータが優れている場合も多いので，「高効率なのはスイッチング・レギュレータ」と思いこまずによく検討してみましょう。

● ノイズの少ないリニア・レギュレータ

スイッチングをしない連続動作の定電圧電源回路をリニア・レギュレータといいます。

リニア・レギュレータは，動作原理 [図 1-9(a)] から，一定の出力電圧を取り



[図 1-10] スwitchング・レギュレータの動作原理

原理的にはほぼ無損失だがスイッチング・ノイズを発生する

見本