

◆ プロローグ

急成長中のオンボード電源

あらゆる電子回路は、電源がなければ動作しません。そして、ほとんどの電子回路はプリント基板に実装されます。このプリント基板をボード(board；板)といいます。「板の上に乗せて使う電源」という意味で、「**オンボード電源**」と呼ばれます。

オンボード電源と聞くとDC-DCコンバータをイメージしますが、プリント基板の上に乗せて使える電源なら、AC入力DC出力の電源でも高圧電源でもオンボード電源と呼んでいいと思います。本書では、このオンボード電源用として最も多用されているDC-DCコンバータを取りあげます。

◆ 急成長が求められている DC - DC コンバータ

■ DC - DC コンバータを取り巻く環境の変化

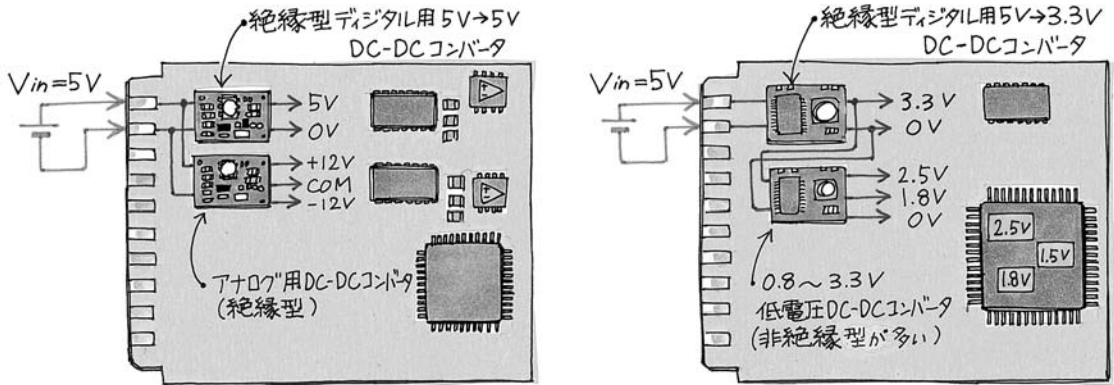
図1(a)に示すように、これまでの電子機器にはアナログ回路とデジタル回路が混在しており、デジタル回路用に+5V、アナログ回路用に±12Vまたは±15Vを準備すれば、ほとんどの電子部品を動作させることができました。

最近では、ICの処理速度を上げるために、半導体の微細化が進んでいます。図1(b)に示すように、**動作電圧は1.8V、1.3V、1V、0.8V…と下がっており、ダイナミックに大きな電流を消費します**。例えば、最新のマイクロプロセッサは、内部のデータ・バス用に+1.5V、CPUとキャッシュ用に+1.8～+2.8V、論理回路用に+2.5V、+3.3V、+5V、+12Vを利用しています。そして、IC内ではたくさんのトランジスタがスイッチングしており、数 μ s間に数十Aという大きな電流を消費します。

これまで、最も使いやすいオンボード電源として使われている電源回路は、リニア方式の3端子レギュレータやロイヤー回路と3端子レギュレータの組み合わせ、そして自励発振型フライバック・コンバータなどです。これらの電源は、ヒートシンク(放熱板)が必要だったり、制御ICの動作電圧が5Vあるいは4V以下であるなど、最近の高密度/高速動作のデジタル基板に対応できなくなってきました。

見本

図1 オンボードの電源スタイルの変化



(a) アナログ回路とデジタル回路が混在するこれまでの基板

(b) 低電圧・大電流・多電圧化した高速デジタル基板

■ 今のDC-DCコンバータに求められているもの

電源回路の出力電圧が低下してくると、これまでのように、一つのユニットで多出力の電源を作り、負荷に供給する方法は通用しなくなります。電源から負荷までのプリント・パターンや回路網のインピーダンス分によるちょっとした電圧降下によって、負荷端での電圧が不足し、誤動作する可能性があるからです。これを解決するのが、負荷の近くに電源を配置する「電源の分散化」(第6章)です。この方法なら、配線パターンや回路網インピーダンスの影響を最小限にできます。

電源の分散化を進めるにあたり、DC-DCコンバータには低電圧入力/低電圧出力/大電流出力/高速応答/低ノイズ…などたくさんの技術的なテーマが与えられています。また、負荷の直近に置くためには小型である必要があり、ヒートシンクが邪魔になりました。高効率化も大きな課題です。

最新のDC-DCコンバータには、次のような性能が要求されています。

- 低出力電圧：+0.8~+5V
- 低入力電圧：+3.3~+5V(バス・コンバータで構成する場合は12Vなど)
- 高効率：90%以上
- 高速応答特性
- 低ノイズ特性
- 入出力コンデンサを使わない
- ヒートシンクを使わない
- SMD(表面実装)対応

■ 新技術でブレーク・スルー！

低電圧回路で効率を上げるには、新しい回路技術と素材の開発(図2)が必要です。次に、最新のDC-DCコンバータを支える技術をまとめます。


見本 低インピーダンスの多層プリント基板
端本など機構部材のSMD化

- 小型低インピーダンス・コンデンサ

図2 DC-DC コンバータを進化させている最新技術


パワー-MOSFET

- 低 Q_g 特性
- 低オン抵抗
- 低電圧動作



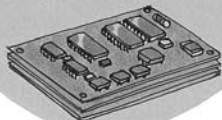
チョークコイル

- 低損失フェライトコア
- 新しい巻き線技術
- 低損失ダストコア

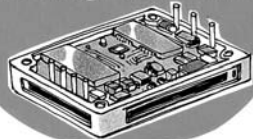


プリント基板

- 多層・低インピーダンス



低電圧・大電流
出力の超小型
DC-DCコンバータ!



制御IC

- 低電圧動作
- 低消費電力動作
- multi chip module
マルチ・チップ・モジュール化



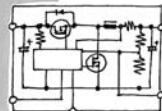
コンデンサ



- 小型で大容量
- 広帯域で低インピーダンス

回路技術

- 広い入力電圧範囲 (3.3 ~ 48V)
- 同期整流方式
- アクティブ・クランプ回路
- 低ノイズ化のためのソフトスイッチング技術
- 並列運転機能



- 大容量小型積層セラミック・コンデンサ
- 低損失フェライト・コア
- 新しい巻き線技術
- 低損失ダスト・コア材
- 低電圧動作の制御IC
- 低損失高周波動作の低 Q_g パワー-MOSFET
- マルチ・チップ・モジュールの開発
- 差別化回路技術
- 低電圧で高効率を実現する新方式の回路
- 入力電圧の多様化 (+ 3.3 ~ + 48 V) への対応
- 同期整流回路

- 見本**
- アクティブ・クランプ回路などの新方式
 - ノイズ化のためのソフト・スイッチング技術
 - 複数のモジュールの並列運転

写真1

TO-3PLパッケージと同サイズの小型DC-DCコンバータBSI-miniシリーズ
[株ベルニクス]

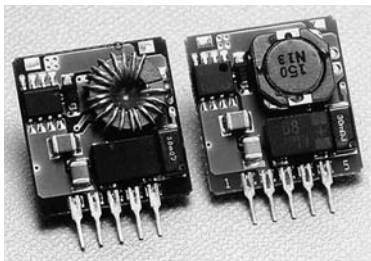


写真2

応答速度160 nsの高速DC-DCコンバータBSVシリーズ
[株ベルニクス]

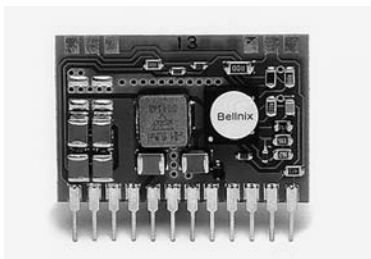
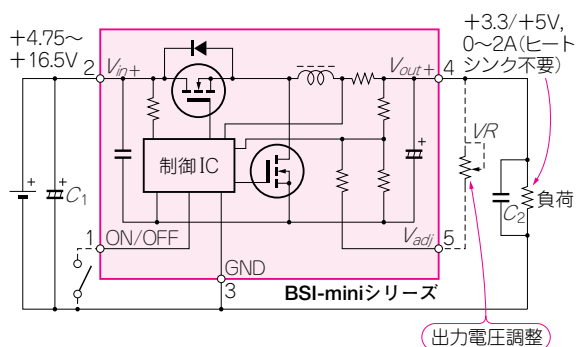


図3 BSI-miniシリーズの接続図と内部ブロック図



◆ 市販の最新オンボード電源を見てみよう！

日本では、高効率なスイッチング方式の非絶縁型ステップ・ダウン・コンバータは例が少なく、ほとんどが欧米の製品です。転流用パワー・ダイオードをパワーMOSFETに置き換えた同期整流方式のDC-DCコンバータ(第2章)も、欧米が最初に製品化しました。現状でも米国の企業が世界をリードしています。では、市場でどこまで低電圧/大電流出力のDC-DCコンバータの製品化が進んでいるのか調べてみましょう。

非絶縁型ステップ・ダウンDC-DCコンバータ

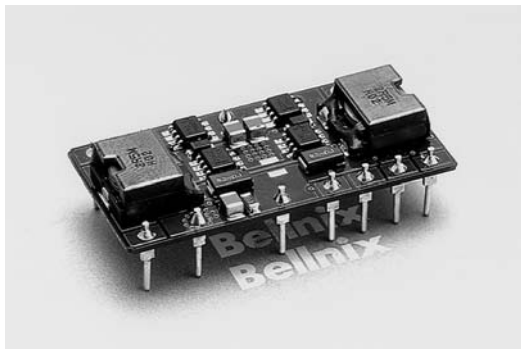
■ TO-3PLパッケージ相当サイズの小型DC-DCコンバータ

写真1に示すのは、出力10Wのスイッチング方式ステップ・ダウン・コンバータです。入力電圧は+4.75~+16.5V、出力電圧は+1.8~+5V、出力電流は2A、効率は93%、外形は20.2×21.5×8.3mmです。

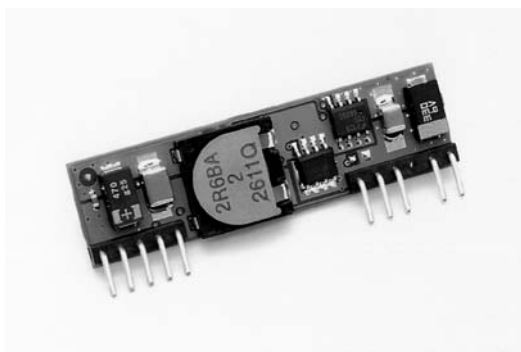
TO-3PLパッケージ相当のサイズに、リニア方式の3端子レギュレータの機能をすべて内蔵しています。図3に示すように、周辺部品はほとんど不要で、使い方は78シリーズの3端子レギュレータと同じです。リニア方式は効率が低いため発熱量が多く、たばこ箱大のヒートシンクが必要ですが、この製品は効率が93%以上もあるので、**ヒートシンクを必要としません**。同期整流方式を採用しているだけでなく、**低損失**のインダクタやパワーMOSFETのゲート・チャージ Q_g の入出力を制御しています。TO-3PLは世界的な標準サイズといえるので、**リニアの3端子レギュレータに取って代わる可能性があります**。

写真3

ヒートシンクなしで40 Wを出力する
DC-DCコンバータ BSI-Pシリーズ
〔株ベルニクス〕

**写真4**

ヒートシンクなしで10～50 Wを出
力するDC-DCコンバータ LSN(B)
シリーズ
〔株ベルニクス/デitel株〕



■ 応答速度 160 ns の DC-DC コンバータ

写真2に示すのは、最大スイッチング周波数3 MHzの高速応答のDC-DCコンバータです。同期整流方式を採用しており、入力電圧は+3～+5.5 V、出力電圧は+0.8～+3.3 V、出力電流は6 A、効率は92%で、+5 Vをメイン電源とする分散化電源に適しています。

高速で負荷電流が変化したとき、電源の出力応答が遅いと電圧が降下します。一般に、負荷端に大きな容量の電解コンデンサを入れて、この電圧降下を防ぎますが、そのぶん広い実装スペースが必要になり、装置を小型化できなくなります。スイッチング周波数を上げると応答速度が高速になるので、付加するコンデンサが小さくて済みます。

■ ヒートシンクなしで40 W以上出力できるDC-DCコンバータ

写真3に示すのは、ヒートシンクなしで40 Wを出力できるDC-DCコンバータです。入力電圧は+4.5～+13.6 V、出力電圧は+1～+3.3 V、出力電流は0～12 Aです。2相型方式と呼ばれる回路方式を採用しています。出力20 Wの二つの同期整流回路を並列運転して40 Wを出力する方式です。互いのスイッチング駆動信号の位相を180°ずつずらしています。見かけ上、発振周波数が2倍になるため、小容量の付加コンデンサで高速応答を実現できます。

写真4に示すのは、50.8×8.64×13.97 mmのサイズで出力10～50 Wを出力するDC-DCコンバータです。入力電圧は+3～+3.6 V、+4.5～+5.5 V、+10.8～+13.2 V、出力電圧は+1.0/+1.2/+

見本

写真5

業界標準 SIP パッケージの DC-DC
コンバータ USN シリーズ
[ダイテル株]

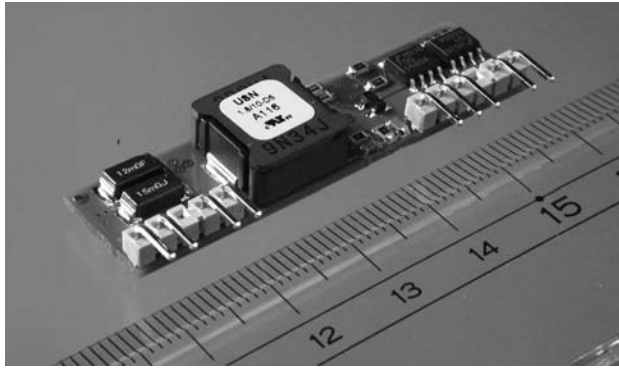


写真6

CPU 駆動用の 5 ビット・プログラマ
ブル DC-DC コンバータ Titania 電源
モジュール Zephyr シリーズ
[タイコエレクトロニクスアンプ株]

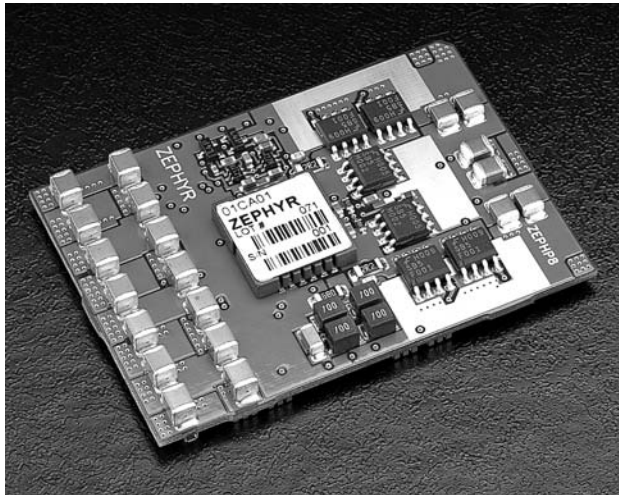
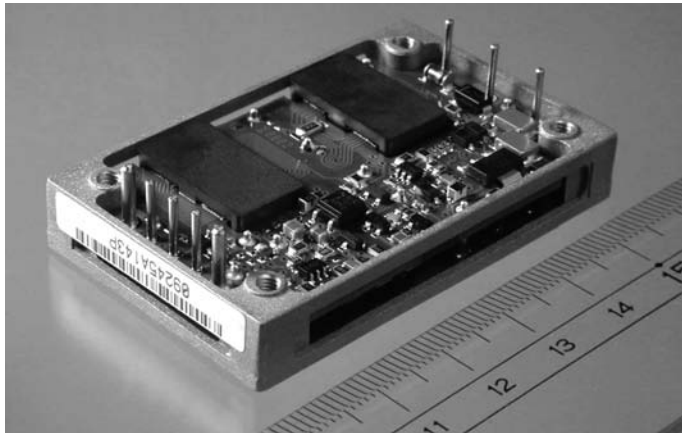


写真7

世界標準サイズの絶縁型 DC-DC コ
ンバータ USQ シリーズ [ダイテル株]



見本

図4

LSN(B)シリーズの内部ブロック図

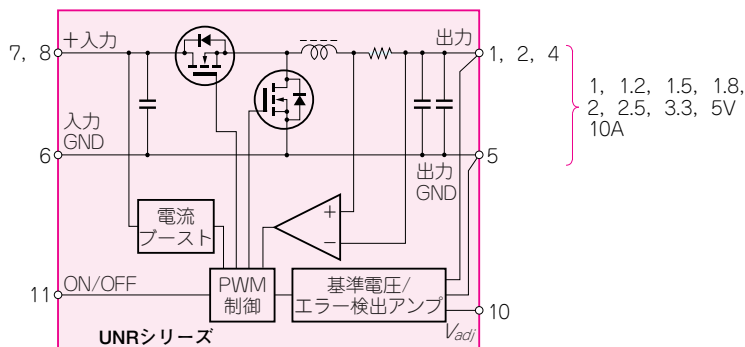
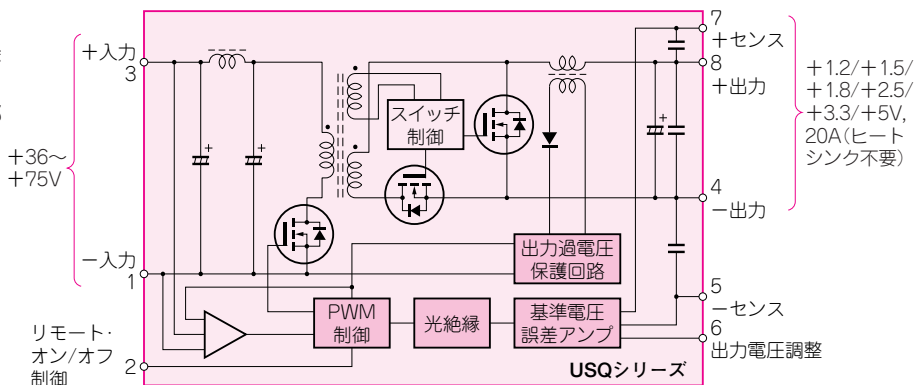


図5

世界標準サイズの絶縁型 DC-DC コンバータ USQ シリーズの内部ブロック図



1.5V/+1.8V/+2V/+2.5V/+3.3V/+5V, 出力電流は10A, 効率は93~95%です。LSN(B)シリーズは同期整流回路を採用し, 管理された Q_g コントロール回路で高効率化が図られています。図4に内部ブロック図を示します。

■ 業界標準 SIP パッケージの DC-DC コンバータ

写真5に示すのは, 業界標準 SIP パッケージを採用した DC-DC コンバータです。入力電圧は+3~+3.6V/+4.5~+5.5V, 出力電圧は+1.2~+3.3V, 出力電流は8A/10Aです。欧米を中心にたくさんの実用実績があります。同期整流方式を採用しており, 実装面積は11×51mmです。

■ CPU 駆動用プログラマブル DC-DC コンバータ

写真6に示すのは, CPUの駆動電源として最も多くの実績をもつ電源モジュール Titania(タイタニア)電源モジュールです。入力電圧は+5V/+12V, 5ビットのVID(Voltage IDentification code)でプログラマブルに出力電圧を設定(+1.3~+3.5V)できます。最大出力電流は16Aです。

絶縁型 DC-DC コンバータ



写真7に示すのは, 多層のガラス・エポキシ・プリント基板で作られた絶縁型 DC-DC コンバータで

写真7は, 世界標準サイズ, 出力+5V/20A(100W)の絶縁型 DC-DC コンバータです。図5に内部

ブロック図を示します。PWM制御のフォワード式スイッチング回路で、2次側は同期整流回路です。用途に応じて、オープン・フレーム・タイプとアルミ・ダイキャスト・ケースに樹脂密封したタイプを選べます。テレコムなどの通信機器やサーバ用途なので、入力電圧は+48V(+36V~+75V)です。

*

電源に限ったことではありませんが、最近の電子機器は高密度になり、重要な回路は集積化されています。DC-DCコンバータも同じで、メーカー製と同等な製品を作るのは、たいへん難しいと思います。例えば、写真7に示す製品を作るには、1000万円以上の初期費用が必要です。

今は、電源用ICを購入して作るか、市販のオンボードDC-DCコンバータを上手に使いこなす時代だと考えます。本書では、ここで紹介したような最新のDC-DCコンバータ・モジュールを購入し、上手に使いこなす方法を中心に解説します。

◆参考文献◆

- (1) DC-DC Converterデータシート，2001年8月，ダイテル(株)。
- (2) Power Systemsカタログ，タイコエレクトロニクスアンプ(株)。
- (3) DC-DCコンバータカタログ，2001年，(株)ベルニクス。
- (4) Beian P. Johnson；次世代高速プロセッサに求められる電源とは，電子技術2000年4月号，pp.6~9，日刊工業新聞社。

見本

◆ 第1章

3端子レギュレータの 基本動作と正しい使いかた

高効率なオンボード・レギュレータを 簡単に実現できる

電子回路は、低電圧/大電流時代に突入しました。いろいろな最新の技術講演を聴いていると、回路の低電圧化はとても急速に進んでおり、5V時代の終焉の観さえあります。これまで電子回路用の電源ICとして、リニア方式の3端子レギュレータは必需部品でしたが、CPUの高速化が電源のありかたを大きく変え、これまでの電源技術では対応できない時代になりました。

本稿では、オンボード電源の定番のリニアIC 3端子レギュレータの動作と特性を徹底研究し、スイッチング方式のステップ・ダウン・コンバータと比較しながら、新時代の高効率レギュレータの回路技術に迫ります。

◆ 1-1 CPUの高速化が電源回路に進化を求めている

■ 超ロング・セラー電源IC「3端子レギュレータ」

スイッチング・レギュレータ時代になった今も、オンボード用の電源回路に最も頻繁に使われているのは、リニア方式のドロップ制御電源です。特に「3端子レギュレータ」と呼ばれる数十W以下の小容量の電圧レギュレータは、実用化されて25年近くになりましたが、その消費数量は一向に減っていません。

この理由は、三つの端子をもつTO-220, TO-3P, TO-3PLの小型パッケージに、**安定化電源に必要なすべての機能を集積しており、よほどのヘマをしないうり動作して、しかも信頼性が高い**からでしょう。リニア方式なのでノイズの発生もとても小さく、安心して他の回路に供給できます。また、ディスクリット部品を使って作るよりも安価です。

3端子レギュレータの長所をまとめると次のようになります。

- 見本** プルな構造で誰でも目的の性能を引き出せる
ア直列制御方式なのでノイズが出ない
- 低価格である

図1-1

オンボード電源の低電圧化

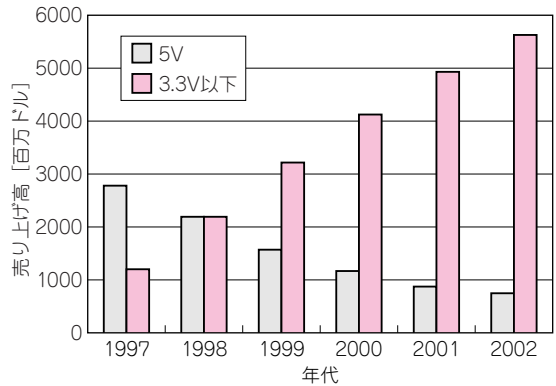
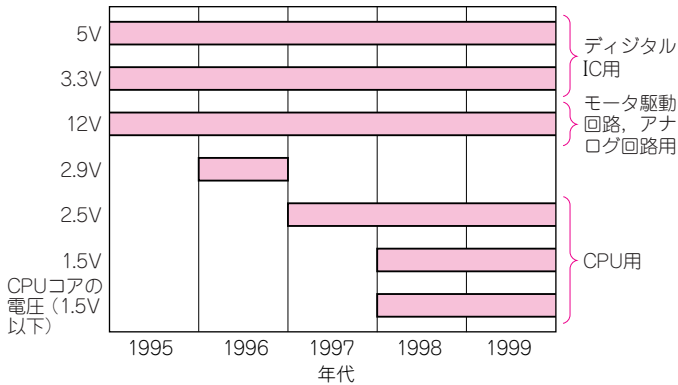


図1-2 ノート・パソコンのマザー・ボードに使用されている電源電圧の変化



数年の間にパソコンの電圧が低電圧化、多出力化している。特にCPUの電源電圧の低下は著しく、ICごとに異なる電圧の電源を供給するようになった。

- 品揃えが豊富で負極性レギュレータもある
- 過熱保護、過電流保護回路を内蔵していて安心して使える

では、短所は何でしょうか。

- 変換効率が悪く発熱しやすい。特に入出力間電圧差が大きい場合、発熱が大きくなり使えないことがある
- 放熱対策のためのヒートシンクが大きなスペースを要する
- 入出力間電圧差は一般品で1.4V以上必要

■ 低電圧/大電流時代の到来と3端子レギュレータの限界

3端子レギュレータはロング・セラー商品と言ってよいでしょう。しかし状況が急変し、対応できないアプリケーションが増えてきました。

図1-1は、米国の調査会社が米国内の電気製品の電源の出力電圧がどのように変化していくか、5Vと3.3V以下に分けて予想したものです。これによれば、1997年に5Vが主力だったものが、2002年には3.3V以下が圧倒的に主流になります。

もう一つ、図1-2に興味深い資料を示しましょう。あるパソコン・メーカーが、ノート・パソコンに使

われている電源電圧を年代別に整理した図です。1995年には5V、3.3V、12Vの3種類の電源電圧でCPU基板が動作していましたが、1999年になるとCPU駆動用の電源電圧2.5V、1.5Vが加わり6種類に増えています。現在発売されているクロック周波数1GHz CPUのパソコンでは、低電圧/大電流化が進んでおり、出力電圧はさらに多出力化(マルチ化)しています。

このように、デジタル回路の低電圧/大電流化が進んでいますが、後述の理由から**3端子レギュレータは低電圧/大電流を出力するのが得意ではありません。**

◆ 1-2 3端子レギュレータのあらまし

■ 3端子レギュレータとは

図1-3に3端子レギュレータのパッケージの外観図を示します。

3端子レギュレータの「3端子」とは、入力端子(IN)、出力端子(OUT)、グラウンド端子(GND)です。まさに、必要最小限の端子で構成されています。ON/OFF端子や出力電圧可変用端子をもつ製品もありますが、これらも含めて便宜的に「3端子レギュレータ」と呼ぶこともあります。

3端子レギュレータを使用して、電源回路を作ることは難しくありません、安定化に必要な機能のほとんどをIC自体がすでにもっているからです。強いて言えば、入力端と出力端に付加するコンデンサの容量と付けかたに注意することぐらいでしょう。**付加コンデンサは、できるだけコンデンサのリードを短くして、3端子レギュレータの端子近くに配置します。**コンデンサを付加しないと、3端子レギュレータが発振することがあります。ほとんどのアプリケーションにおいてコンデンサを付加する必要があります。

■ 電気を熱に変換しながら入出力間電圧を制御する

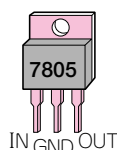
図1-4(a)は、高い入力電圧を必要な電圧に降圧する3端子レギュレータの基本動作を説明する図です。このように、高い入力電圧の一部を熱に変換しながら、出力電圧レベルを安定化する電源の回路方式を**リニア方式**と呼びます。電圧を降圧していることから、「**ドロップ**」または「**ステップ・ダウン・レギュレータ**」とも呼びます。3端子レギュレータはリニア方式ドロップの一つです。

電圧を降下させる方法には、いろいろ種類があります。図1-4(b)は、可変抵抗を使って入出力間の電圧を降下させる回路です。12Vの入力電圧から5Vの出力電圧を得るために、可変抵抗VRで出力電圧が希望の値になるように入力電圧をカットしています。

もう一度、図1-4(a)を見てください。**リニア方式のドロップ電源の入力と出力には、必ず V_{diff} の電圧**

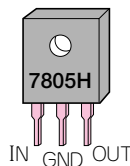
図1-3

3端子レギュレータの外観図



出力電圧+5V, 出力電流
0.5~1A

(a) TO-220

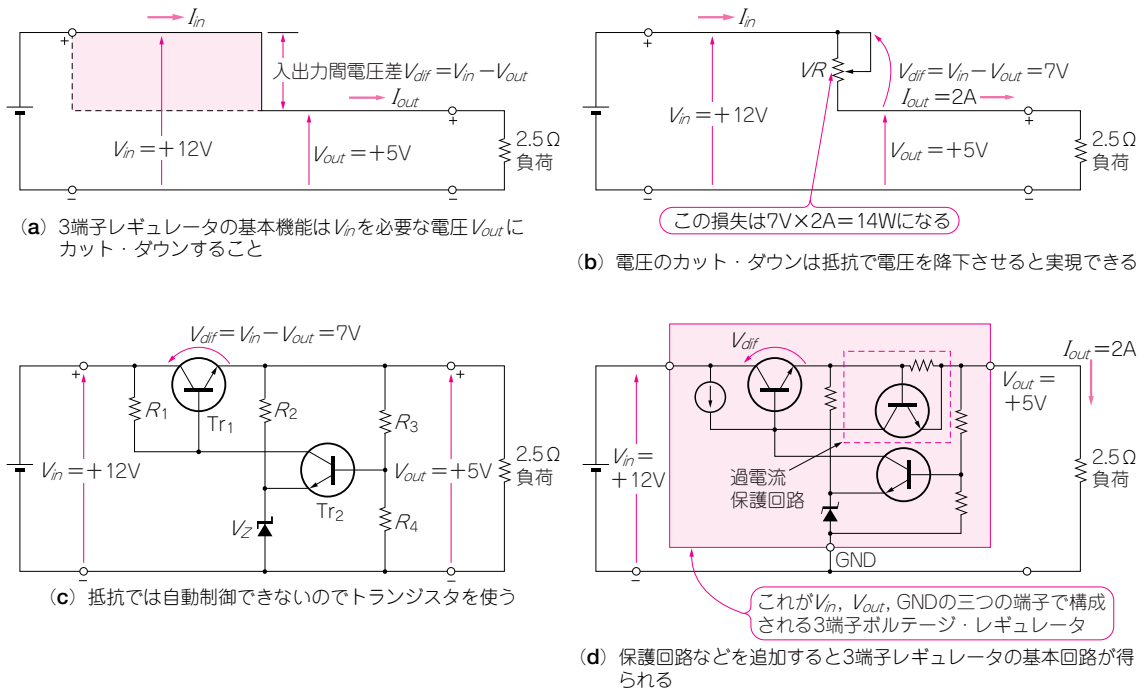


出力電圧+5V, 出力電流
1~2A

(b) TO-3PL

見本

図1-4 リニア方式のドロップ電源の基本動作



差が必要で、この差分は熱に変換されます。図1-4(b)の場合は、VRが電圧差 V_{dif} を背負い、差分を熱に変換します。出力電流を2Aとすると、VRが負担する熱量 P_{DVR} [W]は、

$$P_{DVR} = V_{dif} I_{out} = (12\text{ V} - 5\text{ V}) \times 2\text{ A} = 14\text{ W}$$

$$\text{ただし、} V_{dif} = V_{in} - V_{out}$$

となります。10 W (= 5 V × 2 A) の出力電力を得るために、それより多い14 Wの電力が犠牲になります。実際には、抵抗値の制御が難しいので、トランジスタを使用して図1-4(c)のように作ります。これに過電流保護回路を追加すると図1-4(d)のようになります。

図1-4(d)に過熱保護回路などを加えて、TO-220やTO-3Pパッケージに収納すると3端子レギュレータになります。

■ 実際の3端子レギュレータの内部動作

3端子レギュレータのカタログをよく見ると、設計に必要な情報が記載されています。図1-5に、実際の3端子レギュレータのブロック図を、図1-6に μPC7805 (日本電気)の内部等価回路を示します。この回路にリニア方式ドロップとしてのすべての機能が入っています。

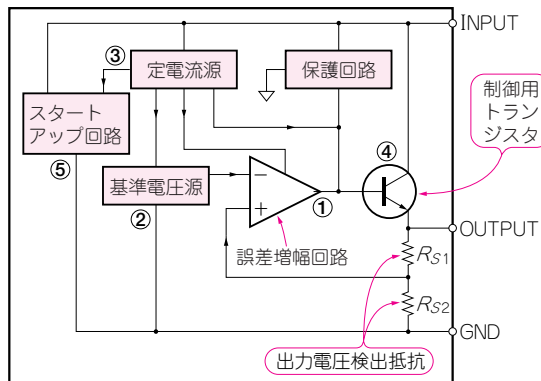
次に各回路ブロックの機能を簡単に説明しましょう。

①誤差増幅器 見本

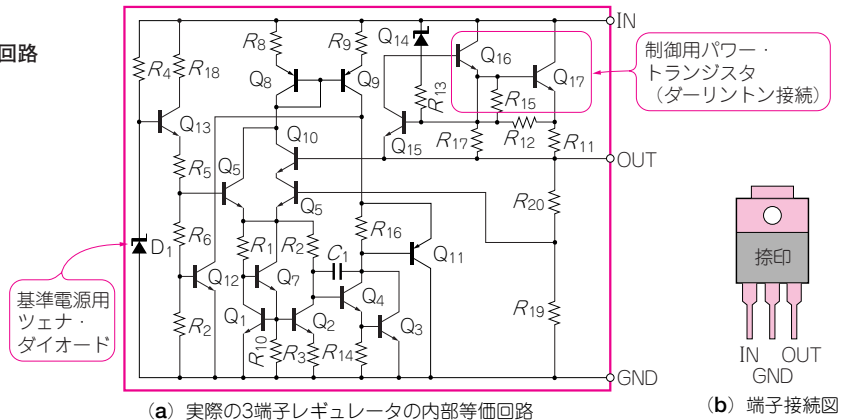
出力の微小な変動を検出し、これを増幅して制御用のパワー・トランジスタの出力電流をコントロールする差動増幅器です。

図1-5

3端子レギュレータの内部ブロック図

図1-6⁽¹⁾

3端子レギュレータの内部等価回路



(a) 実際の3端子レギュレータの内部等価回路

(b) 端子接続図

②基準電圧源

定電流駆動したツェナー・ダイオードによる定電圧基準電源です。

③定電流源

基準電圧源のツェナー・ダイオードに電流を供給します。ハイ・インピーダンスで基準回路を駆動するとリップルが低減し、温度に対する変動も下がります。誤差増幅器にも電源を供給しています。

④制御用パワー・トランジスタ

入力と出力の電圧差を負担し、熱に変換します。信頼性は安全動作領域内での動作マージンとジャンクション温度を下げるための放熱の程度に左右されます。

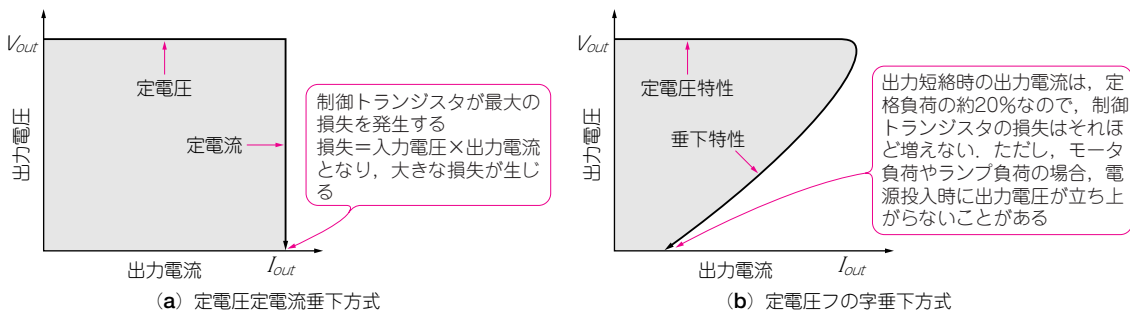
⑤スタートアップ回路

入力電圧が、IC内の各回路が安定動作するのに必要な電圧に立ち上がったのを確認し、起動信号を出力します。

見本 以上の回路のほか、過電流保護回路を内蔵しています。これは、負荷の短絡による過電流を防止する回路です。図1-7に示すように、負荷短絡時の出力電圧の特性の違う2種類の保護回路があります。

また、過熱保護回路も内蔵しています。取り付け不良などで、3端子レギュレータがヒートシンクか

図1-7 2種類の過電流保護回路の動作



ら離れると、パワー・トランジスタが熱で破壊し、負荷を損傷する可能性があります。こんなとき、異常な温度上昇を検知して、出力を遮断します。また、低消費電力機器に適する、出力ON/OFF制御回路を内蔵するものもあります。

◆ 1-3 リニア方式3端子レギュレータは どのくらいの熱処理が必要か

汎用の3端子レギュレータ

■ ヒートシンクを取り付けないと使えない

3端子レギュレータは、電圧安定化のための機能をIC内に組み込んでいるため、ユーザは発振防止用のコンデンサの配置に気を配る程度で問題なく使いこなすことができます。しかし**熱処理は別**です。3端子レギュレータ内部では、制御用のパワー・トランジスタが入出力間の電圧差を熱に変換していますから、この**制御トランジスタを放熱する必要があります**。

図1-8 3端子レギュレータはヒートシンクに取り付けて使う

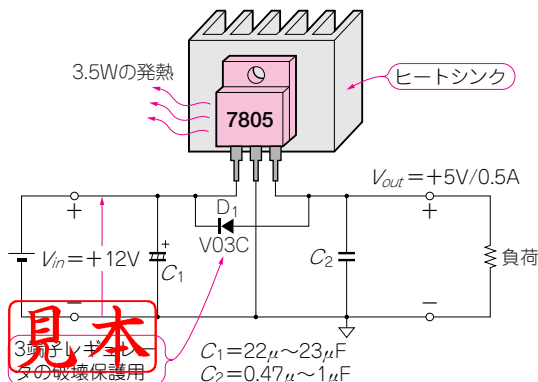


図1-9 (1) 3端子レギュレータ $\mu PC7805H$ の消費電力とヒートシンクの大きさの関係

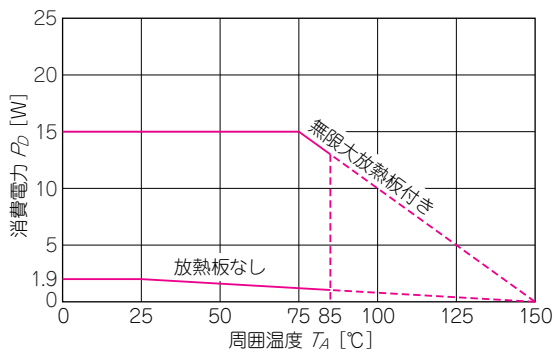


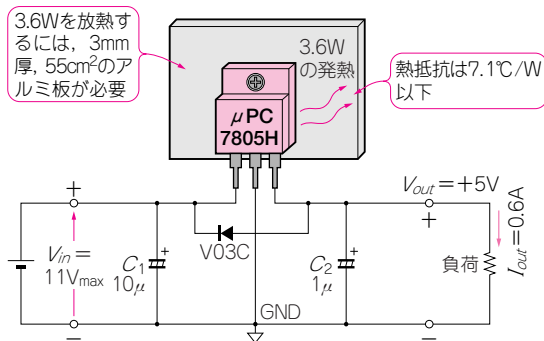
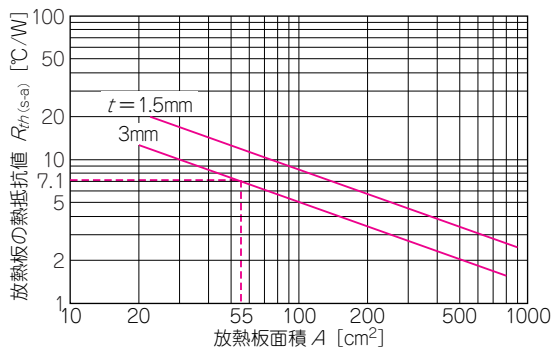
図1-10 (1) 3端子レギュレータ μ PC7805H の熱設計

図1-11 アルミ平板の面積と熱抵抗



3端子レギュレータの変換損失は、図1-4(b)に示した可変抵抗によるドロップ電源と同じで、入出力間電圧差に出力電流を乗じた値です。前述のように、3端子レギュレータに代表されるドロップ電源は、入力電圧を降下するときに、大きな電力を消費しており発熱します。ですから、図1-8に示すように、3端子レギュレータはほとんどの用途においてヒートシンクを取り付ける必要があります。

例えば、入力12V、出力5V/0.5A電源回路を想定して、変換損失 P_{loss} [W]を計算してみると、

$$V_{dif} = 12\text{V} - 5\text{V} = 7\text{V}$$

$$P_{loss} = 7\text{V} \times 0.5\text{A} = 3.5\text{W}$$

と求まります。ヒートシンクの必要性は図1-9から明らかです。この図は、3端子レギュレータにどれだけの電力損失を負担させられるかを表にしたもので、どこのメーカーのカタログにも記載されています。図は、ヒートシンクがなければ、周囲温度が50°Cのとき、1.6Wしか3端子レギュレータに負担させられないことを示しています。ヒートシンクなしではほとんど負荷電流を流せません。

無限大の放熱板に取り付ければ、15W(最大消費電力)を消費できると記載していますが、実際には無限大の放熱板は作れません。最大消費電力とは、ケース温度 T_C を25°Cに保つことができたとき、内部のジャンクション温度 T_J が150°Cに達する電力ですから、理想使用条件下での限界値と解釈してください。ただし、強制空冷や水冷で放熱する場合は、無限大放熱器に取り付けたときの動作条件に近づきます。

■ 損失電力3.6Wのときのヒートシンクの面積はどのくらい？

図1-10を例に、3端子レギュレータに取り付けるヒートシンクの大きさを算出してみましょう。まず、設計目標を次にまとめます。

- 3端子レギュレータ： μ PC7805H
- 出力電圧 V_{out} ：5V
- 最大出力電流 I_{out} ：0.6A
- 最大入出力間電圧差 V_{dif} ：6V
- 最大周囲温度 T_A ：60°C

- 最大ジャンクション温度 T_J ：100°C(信頼性の基準をどこに設定するかによる)

使用状態でのジャンクション温度 T_J とヒートシンクの熱抵抗 $R_{th(s-a)}$ との間には次のような関係があります。

見本