

次世代のエレクトロニクスを作る

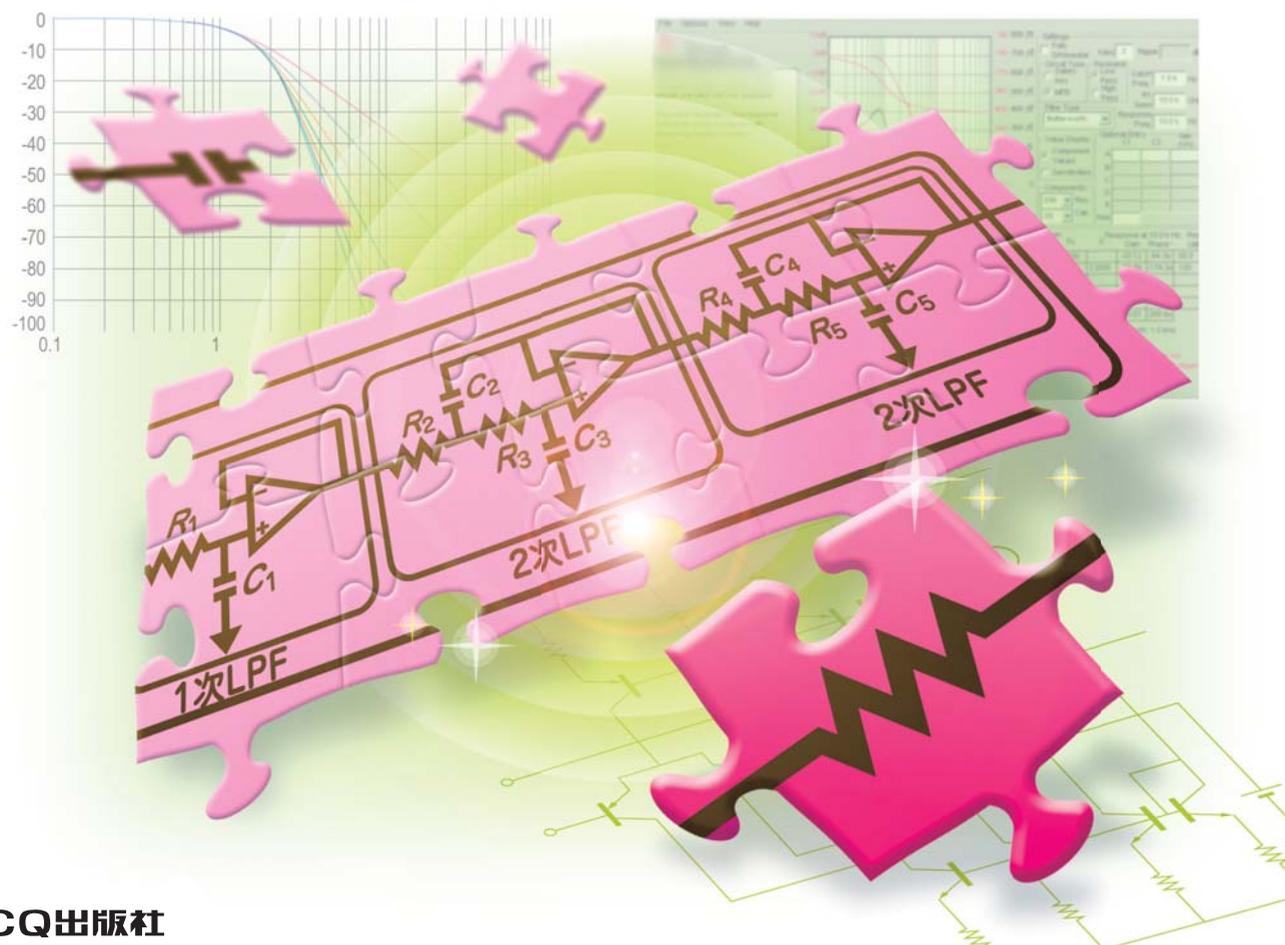
2013  
Spring  
No.122

# トランジスタ技術 SPECIAL

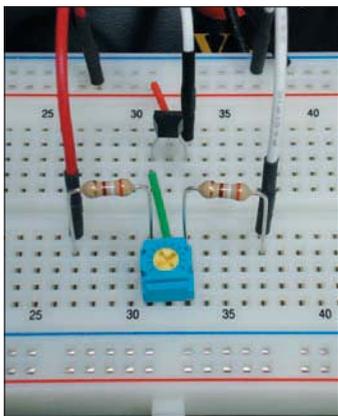
見本

オームの法則からアンプ/フィルタの作り方まで

## やりなおしのための 実用アナログ回路設計



# 第1部 はじめてのアナログ回路の考え方



## 第0章 五つの知識を思い出す



# 教科書は役立たない?

アナログ回路は難しく、数式だけで設計や試作に手間がかかってめんどくさい! と思っていませんか? アナログ回路が専門の人たちは、教科書に載っている五つの法則をベースに設計しているだけです。この基本的な事柄を復習しておくだけで、難解に思っていたアナログ回路の動作が見えてきます。

### 教科書の基礎知識と技術の間を埋める

アナログ電子回路に必要な基礎知識を、簡単な応用回路を実際に設計することで復習していきます。応用回路は、図1のようなマイコン周辺回路です。

実際の製品で使われている実用的な回路を選びました。

復習する基礎知識は主に、次の五つです(図2)。

- (1) オームの法則
- (2) キルヒホッフの法則
- (3) テブナンの定理
- (4) 交流理論
- (5) 重ねの理

この五つを覚えているだけで基本的な電子回路の考え方がある程度分かるようになります。設計ができるようになることに驚くと思います。教科書のあの話は実際はこんなところに使うのか、とお楽しみください。



図2 復習する主な五つの基礎知識

基礎は変わりません。学校で学んだ基礎は、思いのほか役に立ちます。社会人になっても、教科書を捨てたり、誰かに譲ったりしないでください。

説明が不足している箇所もたくさんあります。物足りない(分からない)と思ったときは、関連する分野の

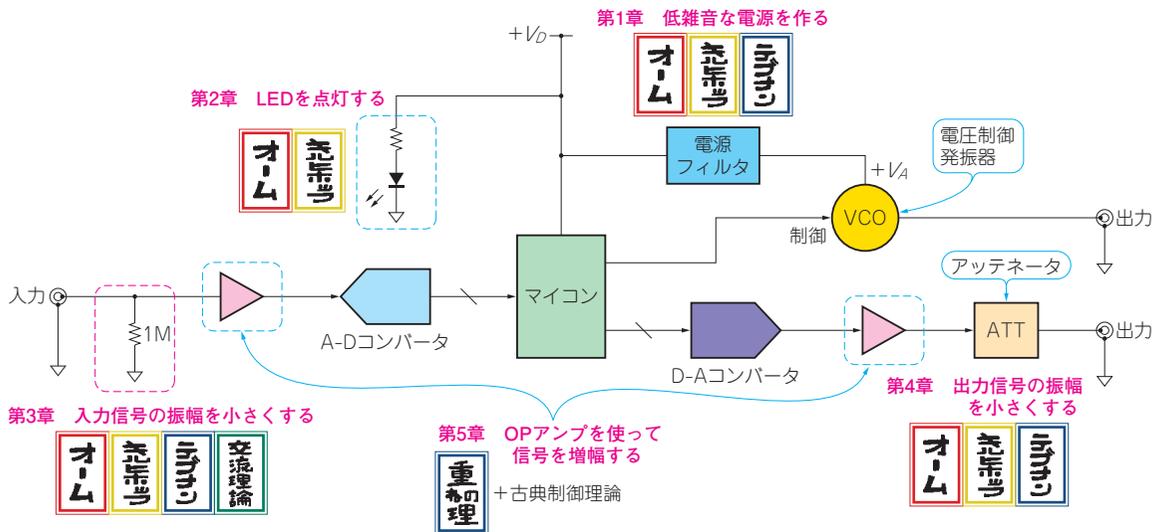


図1 第1部で取り扱うアナログ電子回路の基礎知識はマイコン周辺回路への応用を想定している

第1章 直流電気回路の基礎  
知識だけで設計できる



# 低雑音な電源を作る

電気回路の教科書で最初に出てくる基本的な法則は、実際の回路設計でも大活躍します。教科書で最初に学ぶオームの法則、キルヒホッフの法則、テブナンの定理を使ってバイポーラ接合トランジスタ(BJT)を使ったアクティブ・リプル・フィルタを設計します。このリプル・フィルタは製品内部の電源ノイズの除去などに使われます。

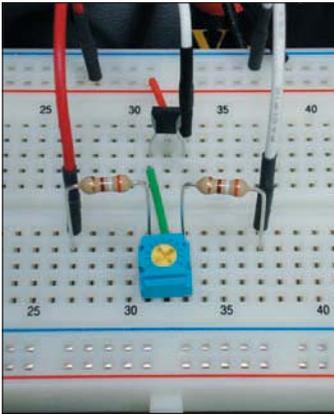


図1(a)は+5Vから+2~+3Vの電圧を取り出す回路です。この回路の抵抗値を決めながら、基礎知識を復習します。

簡単な回路ですが、図1(b)のようにレギュレータIC用語と組み合わせて、計測器内部の低雑音電源回路の一部など、実際の製品に使われています。3端子レギュレータ用語などと比較して出力雑音が小さいためです。リプル用語・フィルタと呼ばれることもあります。

電圧制御発振器(VCO)用語の電源などには低雑音性能が要求されます。ただし、この回路の出力電圧は安定化されていないから、負荷電流の変動が激しい箇所には使えません。

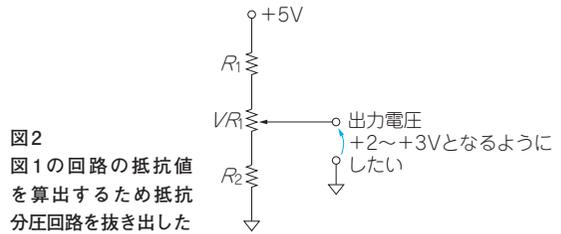


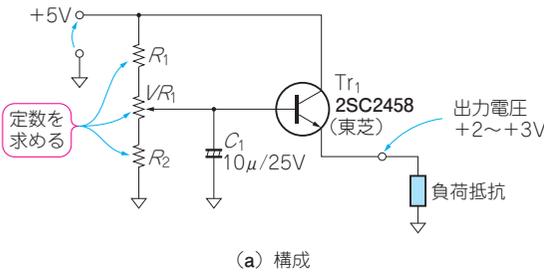
図2 図1の回路の抵抗値を算出するため抵抗分圧回路を抜き出した

## 分圧回路から考える

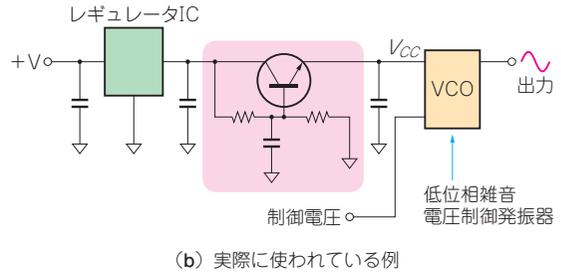
### ■ 定数に当たりをつける

トランジスタの動作はひとまず忘れて、この回路に含まれる分圧回路の定数を決めることにします。

図1の回路から、抵抗分圧回路を抜き出したのが図



(a) 構成



(b) 実際に使われている例

図1 +5Vから+2~+3Vを作る回路で使っている抵抗の定数を求めたい

### ▶レギュレータIC

一定の電圧を出力する電源回路(定電圧電源回路)に使われるICの総称。出力電圧を調整する方法としては、トランジスタのコレクタ-エミッタ間に電圧をためておいて、負荷変動に合わせて出力電圧をアナログ的に制御するリニア方式や、トランジスタをスイッチング素子として使い、ON/OFFを繰り返して出力の平均電圧を監視、制御するスイッチング方式がある。

### ▶3端子レギュレータ

アナログ制御の定電圧電源回路であるリニア・レギュレータ回路を1チップで実現することのできるICのこと。ICの端子数が入力、出力、グラウンドの3本であったことから3端子レギュレータと呼ばれる。最近のICでは、出力電圧に含まれる雑音を減らすためのコンデンサを付ける端子や、出力電圧のON/OFFを行う端子が付いていたりして実質5端子の製品もある。このようなICでも、簡単にアナログ電源回路を作ることのできるICという意味で3端子レギュレータと呼ぶ人もいる。

用語

## 第2章 オームの法則とキルヒホッフの法則の実践活用

オーム  
電流

# 電流を制限する回路を考える

本章では、LEDの点灯方法について基礎から解説します。これから作る回路は、明るさが変化しないようにLEDを点灯する回路です。豆電球もLEDも流れる電流が変化してしまうと明るさが変わってしまいます。

電源がONしていることがわかりやすいように、発光ダイオード(LED)によるパイロット・ランプをつけて、装置に電源が供給されていることを表示することがあります。

### LEDの特性から点灯方法を考える

LED用語を点灯させるには、図1のようにLEDのアノードからカソードに向けて電流を流します。この電流を順方向電流と言います。この電流を流すために図1(b)に示したようなしくみが必要になります。このしくみの正体は、LEDに流れる電流を一定値に制限する「電流制限回路」です。

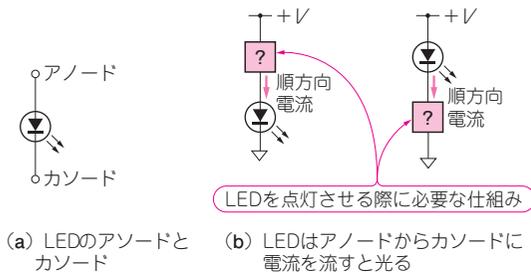


図1 LEDは順方向電流を流すと光る

#### ▶ LED (Light Emitting Diode)

順方向に電圧を加えると発光するダイオードのこと。発光ダイオードとも呼ばれる。

AlGaAs, GaP, AlGaInPなどの化合物半導体によって作られており、発光波長はバンドギャップ・エネルギーによって決まる。発光は電子と正孔の再結合によって生じる。

LEDは、エネルギー・バンドの中にポテンシャル井戸構造を作ることによって電子と正孔の再結合が生じやすくなるようにしている。

#### ■ 豆電球の点灯にはいらなかった電流制限回路がLEDに必要な理由

小学校の理科の授業で豆電球を点灯させたことを覚えているでしょうか？

豆電球は図2のように電圧を加えることで点灯しました。この回路と図1の回路を比較すると、電源とLEDの間に入っているような「しくみ」がないことに気がきます。

#### ● 豆電球とLEDの電圧-電流特性の比較

小学校の理科の授業では、電池の数やつなぎ方を変えて豆電球に加える電圧と点灯の明るさの関係を確認するだけで、豆電球の特性までは考えなかったと思います。中学校の理科でも、なぜか豆電球の電圧-電流特性には触れません。

そこで、図3に示す方法で豆電球の電圧-電流特性を測定してみました。電圧-電流特性というのは、電圧を変化させたときの電流の変化を示した特性のことです。抵抗値は、オームの法則から電圧÷電流で求め

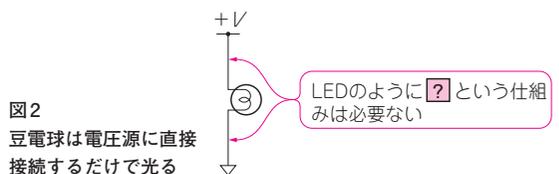


図2

豆電球は電圧源に直接接続するだけで光る

用語

#### ▶ 光度

光源からある一定方向に放射された単位立体角当たりの明るさを表わす心理的な量のこと。単位は [cd] (カンデラ)である。

#### ▶ 絶対最大定格

デバイスを動作させることのできる最大条件のこと。電圧、電流、電力、発熱などデバイスを劣化させる恐れのあるパラメータについて絶対最大定格が規定されている。デバイスを動作させるときは、一瞬であってもこの定格を越えないように設計しなければならない。

## 第3章 交流理論、微分積分、 複素数が役に立つ

オム  
タテマ  
タテマ  
重理

# 入力信号の振幅を小さくする

交流信号を扱う回路（交流回路）について考えます。交流信号とは、一定時間ごとに大きさが変化する信号のことです。電子回路におけるもっとも基本的な交流信号は、三角関数の  $\sin$  で振幅の時間変化を表現することのできる正弦波信号です。正弦波信号の大きさは、正の値と負の値が時間に応じて入れ替わるといった特徴があります。

交流回路について、図1に示す高入力インピーダンス用語・バッファ回路を例に考えます。これはオシロスコープのパッシブ・プローブをA-Dコンバータ用語回路に接続するための回路です。A-Dコンバータ回路の入力インピーダンスは数十k $\Omega$ 程度とあまり高くありませんが、前段にこの回路を接続することで、入力インピーダンスを1 M $\Omega$ に変換します。

オシロスコープのパッシブ・プローブには、図2のように $C_1$ や $C_2$ といったコンデンサが含まれています。コンデンサとはどのような部品なのか、最初にコンデンサの回路素子としての性質を復習し、次に抵抗とコ

ンデンサが組み合わさったRC回路のゲイン用語と位相の周波数特性について考えます。最後に、図1に含まれる減衰回路を設計します。バッファ回路は第5章で設計します。また、入力/出力インピーダンスについても第5章で説明します。

## 分圧回路とバッファ回路の役割

- 分圧回路により耐電圧の10倍の信号も回路に取り込めるようになる

入力インピーダンスを1 M $\Omega$ としておくと、図2の

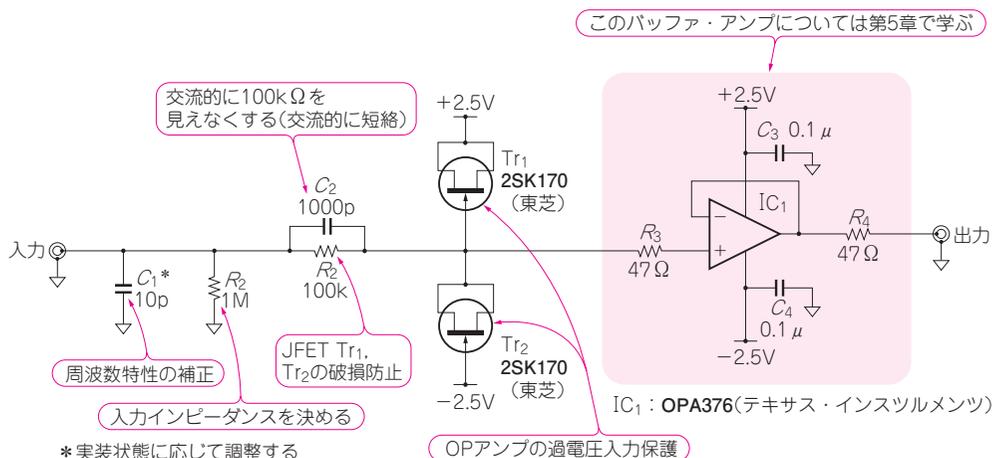


図1 設計の目標とした高入力インピーダンス・バッファ回路

入力インピーダンスが数十k $\Omega$ とあまり高くはないA-Dコンバータ回路の前段などに使う。本章では入力部の分圧回路を設計する。

用語

### ▶インピーダンス

電気回路の交流電流の大きさは、抵抗のほかはコイルやコンデンサによっても制限される。

コイルやコンデンサは交流電流の大きさや位相を変える働きを持っている。この働きは交流に対する一種の抵抗のように作用する。抵抗や、コイル、コンデンサの交流信号に対する一種の抵抗のような作用をインピーダンスと言う。

### ▶入力インピーダンス

回路の外界から入力端子を見たときのインピーダンスのこと。

低周波回路で入力インピーダンスと言ったときは、入力抵抗のことを指す場合が多く、高周波回路(100 MHz以上)の場合は大きさと位相を含む本来のインピーダンスを指すことが多いようである。

## 第4章 テブナンの定理の実践活用

444

## 出力信号の振幅を小さくする

面倒な計算が続いたので、少し休憩しましょう。

これまで復習してきた基礎知識だけで設計できる回路を考えてみることにします。テブナンの法則を使うだけで、下の図1に示すような出力電圧の減衰回路の設計ができます。第0章の図1にある出力バッファに相当する回路を考えてみます。

これから設計する回路は出力電圧を0 dBと-20 dBに切り替えることができます。これを実現するには入力バッファと同じように分圧回路を考えれば良いのです。

0 dBは減衰回路なしで出力すれば良いだけなので、ここでは-20 dBの減衰回路を考えてみます。

## 出力部に追加する分圧回路を設計する

## ● テブナンの定理を使って設計式を求める

単純な分圧回路を図2に示します。この分圧回路の出力インピーダンス $Z_{out}$ は、

$$Z_{out} = R_1 // R_2 \left( = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

になります。

ここで、 $Z_{out}$ がどんな値でもかまわないのであれば、適当な抵抗値を使って、ただ分圧比だけを考えればOKです。第3章で行った入力減衰回路と同じような設計をすれば問題ないでしょう。

● 減衰量可変で出力インピーダンス一定にするには  
ところが、ここでさらに注文がついたとします。それは、出力インピーダンス $Z_{out}$ を600 Ωにしてください

い、というものです。

出力インピーダンスは0 dBでも-20 dBでも600 Ω一定にする必要があります。切り替えもスイッチ1個で実現できれば回路が簡単になります。

そこで、図3のようにして2連スイッチを使って減衰量を切り替えることにします。写真1に、2連スイッチの外観を示します。

## ▶ 0 dB側の回路

図3のうち0 dB側は出力インピーダンス600 Ωの条件から、 $R_0$ に600 Ωの抵抗を使います。E24系列で設計するとすれば1.2 kΩの抵抗を並列接続しておけば良いでしょう。

## ▶ -20 dB側の回路

一方、-20 dB側は設計式を考える必要があります。この設計式を導出してみましょう。

ここで必要になるのがテブナンの定理です。テブナンの定理を使って600 Ωの出力インピーダンスを得つつ振幅を1/10(-20 dB)とする抵抗分圧回路の条件式を求めた結果を図4に示します。

定数設計した結果を図5に示します。

(初出:「トランジスタ技術」2009年2月号 特集第4章)

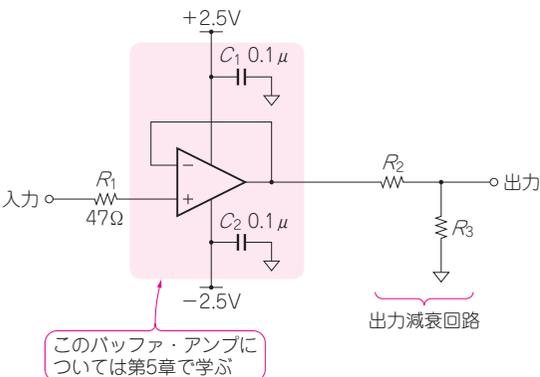


図1 アンプの出力に追加する減衰回路を設計する

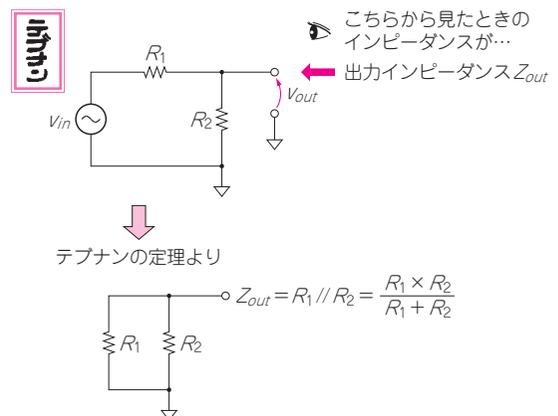


図2 分圧回路の出力インピーダンスをテブナンの定理から求める

## 第5章 重ねの理と古典制御工学が役立つ

重ねの理

# OP アンプ増幅回路入門

第3章、第4章に出てきた、バッファ・アンプのしくみを紹介します。回路を考えるにあたって、まず、OP アンプ増幅回路と、重ねの理を思い出します。手始めに、代表的な OP アンプ増幅回路である反転増幅回路と非反転増幅回路のゲインを求める設計式を導出します。また、負帰還の安定性を回路シミュレーションによって確認する方法についても簡単に触れます。

### 理想的な OP アンプの動作

#### ● まずは大まかに挙動を確認する

図1は理想OPアンプの条件を示したものです。OPアンプ回路は、実際の特性を詳しく検証する前にこの理想OPアンプを使って考えます。

回路シミュレーションを行う場合でも、最初は理想OPアンプによって回路がアイデアどおりに動くかどうかをシミュレーションします。

細かな特性を確認するためのものではなく、**大まかな挙動(ビヘイビア)を確認するために行く、ビヘイビア・シミュレーション**と言います。

回路動作の原理を理解しないうちに、メーカーが提供しているマクロ・モデル(トランジスタ・モデルではなく、非線形電圧源などを使って実物の特性に近くな

るように作られたビヘイビア・モデル)によってシミュレーションすると、使用しているOPアンプの特性上の問題なのか、それとも回路設計を間違えたのか判断がつかなくなってしまいます。手計算による回路動作の解析方法の基本を理解しておくことが大切です。

#### ● 制御電源に置き換えて考えられる

図1に示した理想OPアンプは、教科書に載っている表現を使えば、図2の電圧制御電圧源に相当します。実際に、OPアンプ回路のビヘイビア・シミュレーションを行うときは、**シミュレータに組み込まれているこの電圧制御電圧源(VCVS)を使ってシミュレーションするだけで十分なことがあります。**

図2に示したように制御電源(従属電源と呼ばれることもある)には以下の4種類があります。

#### ▶ 電圧制御電圧源(Voltage Controlled Voltage Source)

#### 理想OPアンプ

- ①ゲインが無限大  
 $V_{out} = \infty \times (V_{in+} - V_{in-})$
- ②入力インピーダンスが無限大
- ③出力インピーダンスがゼロΩ
- ④周波数特性が無限大周波数まで平坦

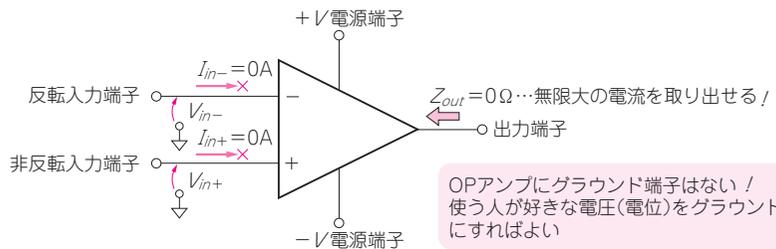


図1 OPアンプの記号と理想OPアンプの条件

#### 用語

#### ▶ RMS

Root Mean Squareの略で実効値のことを言う。

数学的には、電圧波形を各瞬時値で捉えたとき、その瞬時値の2乗の平均の平方根が実効値である。

交流信号は絶えず大きさが変化しているので、何らかの数学的操作を行って大きさを定義する必要がある。

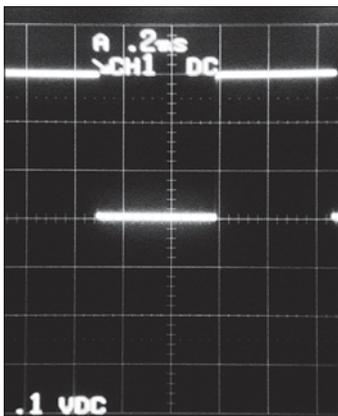
そこで、直流と同じ電力が得られるような交流をその直流の大きさを示す方法が考え出され、それを実効値とした。直流の1Vと交流の1V<sub>RMS</sub>は発生する電力が等しい。

#### ▶ オープン・ループ・ゲイン

OPアンプの反転-非反転入力端子間の電圧を  $V_I$ 、出力電圧を  $V_O$  としたとき、

$$A_O = \frac{V_O}{V_I}$$

で求まるゲインをオープンループ・ゲインと言う。測定システムの例を図Aに示す。



## 第6章 現実の部品は考えなくては いけないことがいっぱい!

# 入出力バッファ回路を作る

今まで学んできたことのまとめとして、オシロスコープのプロブが接続できる周波数補正回路つきの入力バッファ回路と出力インピーダンスが一定の減衰回路を持つ出力バッファ回路を実験します。製作する回路はゲイン1倍のバッファ回路です。バッファ回路をやめて増幅回路に変更してみると、さらに勉強になるでしょう。回路に必要な性能が得られない場合のデバッグについても紹介します。

第5章では、OPアンプ回路の基本から負帰還の基礎とシミュレーションによる安定性の確認方法まで早足で復習してきました。これまでの内容で、必要最低限のアナログ回路設計を行うことは可能です。

教科書と実務の大きな違いの一つ挙げるとすれば、回路設計の現場では最初にICの選定を行うことがあります。ICの選定や周辺部品を選ぶときは教科書には載っていない現実の部品に関する知識が必要になります。

第1部の最後の仕上げとして、今まで勉強してきた知識を使って、第3章で出てきた、オシロスコープのプロブを入力に挿入できる高入力インピーダンス・バッファ回路と、出力減衰回路付きバッファ回路の設計を仕上げてみることにしましょう。

### OPアンプICを使う前に 知っておきたいこと

#### ● 外観とピン配置

OPアンプICは写真1のような外観をしています。それぞれの端子名はほとんどの場合図1のようになっています。ときどきこれとは違ったピン配置になっているICがありますから、必ずデータシートを見てピ

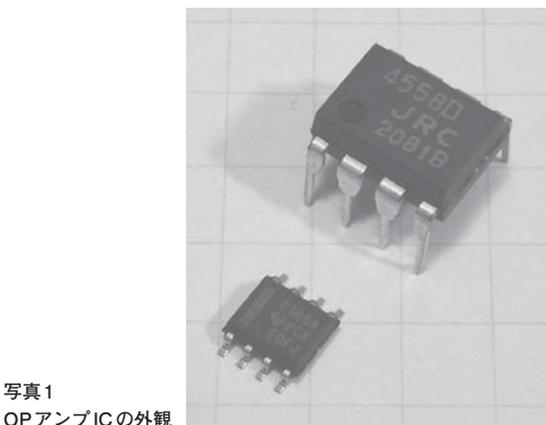
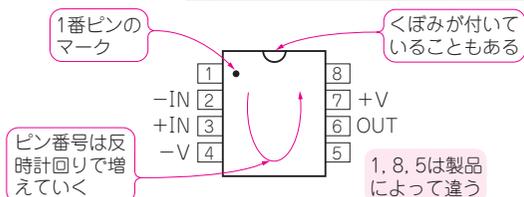
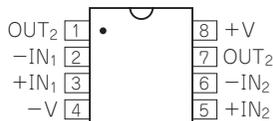


写真1  
OPアンプICの外観



(a) 1個入りOPアンプIC



(b) 2個入りOPアンプIC

- IN：反転入力端子
- +IN：非反転入力端子
- OUT：出力端子
- V：電源端子(負電圧)
- +V：電源端子(正電圧)

(c) 端子の割り付け

図1 OPアンプICの端子配置

#### 用語

#### ▶ パスコン

電源ラインのインピーダンスを下げるために取り付けられたコンデンサのこと。

学校の教科書では登場しない用語だが、現場の技術者がパスコンといった場合は、このような電源-グラウンド間をバイパスするコンデンサを指している。

#### ▶ 異常発振

発振器は発振させるためのものであるが、発振器ではない回路が発振してしまうのは機能不良である。このような想定外の発振現象を総称して異常発振と呼んでいる。異常発振は、システムに想定外の信号を出現させることにほかならないため、システム・ダウンの引き金になったり測定器であれば測定誤差増大の原因となる。

異常発振とは、煙センサが煙を感知したわけでもないのに、警報を出してしまうようなものである。



## 第7章 高域で減衰する フィルタ回路を作るために

### ステップ1

# チャレンジ！ロー・パス・ フィルタの設計

フィルタ設計の第1歩は、フィルタ仕様を定義することです。フィルタ回路を実現するためには信号の性質に応じていろいろな方法があります。フィルタ回路を設計するうえで必要になる最低限の知識を復習し、最後にOPアンプを使った代表的なフィルタの一つであるバターワース型ロー・パス・フィルタ回路を設計します。

### ロー・パス・フィルタが設計できれば フィルタの8割は問題ない

A-Dコンバータ(ADC)の前段や、D-Aコンバータ(DAC)の後段に追加するフィルタ(アンチエイリアシング・フィルタや、スムージング・フィルタ)には、多くの場合、ロー・パス・フィルタ(LPF)が使用されます。

現実には、LPFではなく、バンド・パス・フィルタ(BPF)が使用されることもあります。しかし、**8割はLPFだと思ってもらってよい**でしょう。従って、**LPFが設計できれば、低周波アナログ回路で要求されるフィルタ回路の8割は設計できると**思います。

また、実際に使われているOPアンプを使ったLPFの8割は、これから説明する**VCVS型**や**多重帰還型**と呼ばれる回路で実現されています。

つまり、第2部で説明するフィルタ回路の設計手順をマスタすれば、みなさんが必要とするアクティブ・フィルタ回路の6割は設計できることになります。

アナログ回路入門者であれば、世の中で必要なアクティブ・フィルタ回路の6割が設計できれば十分でしょう。もし、みなさんが、さらに高度なフィルタ回路設計を要求される立場(つまり、電子回路設計のプロ)になった暁には、この章の最後の参考文献(p.95)などでさらに知識を深めてください。

特に、第2部では取り扱わないOPアンプを使用したフィルタ回路として有名なのは、周波数依存負性抵抗(FDNR: Frequency Dependent Negative Resistance)回路を使用したLCシミュレーション型アクティブ・フィルタがあります。

FDNR型アクティブ・フィルタ回路は、高次のフィルタを精度良く容易に構成できるたいへん有用なアーキテクチャです。このフィルタ回路の設計方法については、必要に応じて、参考文献(1)(p.95)などを参照してください。

### フィルタの種類

#### ● フィルタとは必要な信号だけを取り出すもの

電子回路でいう**フィルタ(filter)**とは、ノイズなどのいろいろな成分が混ざった信号の中から「必要な信号」だけを取り出すための機能ブロックのことです。

ノイズ成分を含む信号の中から必要な信号だけを取り出す技術にはいろいろなものがあります。具体例を挙げると、自己相関関数を利用してノイズ成分を除去する方法や、ロックイン・アンプに使われているような同期検波によって必要な信号成分を検出する方法などです。

しかし、もっとも古典的な技術は、必要な信号と不必要な信号(ノイズ)を周波数軸上で分けて考え、**信号が含まれている周波数帯域の成分だけを取り出す**という方法でしょう。

そのようなわけで一般に、アナログ回路の分野でフィルタ回路と呼ばれるものは、広い周波数帯域の中からある特定の周波数成分だけを通過させることのできる回路のことを言います。ただし例外的に、振幅を変化させず位相だけを変化させるオール・パス・フィルタ(APF)というフィルタもあります。

#### ● 信号の周波数帯によって実現方法が変わる

周波数を選択するフィルタには、いくつかの実現方法があります。大きく分けると次の三つになります。

##### ▶ 集中定数型フィルタ

代表例は、コイルやコンデンサを使った**LC**フィルタや、抵抗やコンデンサを使った**RC**フィルタなどです。機械的な振動を利用したものも含めると、AMラジオやFMラジオなどの中間周波数フィルタによく使われているセラミック・フィルタや、通信機器に使われているクリスタル・フィルタなどもあります。

集中定数型フィルタは**数十kHzの低周波から数百MHzの高周波まで**幅広く使われています。

第8章

通過帯域の位相変動が小さい  
フィルタ回路を作るために

ステップ2

# ベッセル型ロー・パス・フィルタの設計

パルス信号は、時間と振幅成分に情報が含まれています。そのため、オシロスコープで観測した信号波形が変形すると情報が損なわれます。信号波形が歪まないように帯域制限をかける代表的なフィルタ回路がベッセル・フィルタです。OP アンプを使ったベッセル型ロー・パス・フィルタ回路の設計法を紹介します。

- パルス信号には位相変動の小さいフィルタが必要  
位相変動が小さいことを「群遅延特性(後述)の変動が小さい」と言います。

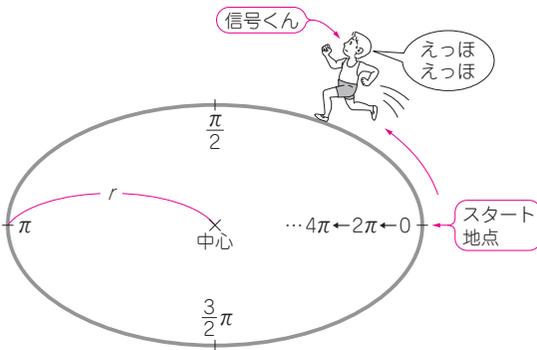
この特性は、特にフィルタ回路にパルス信号を通過させるときにたいせつな特性になります。身近なパルス信号としては、ビデオ信号があります。

## 群遅延特性とは？

- 位相とは何か

位相変動の話をする前に、まず、位相とは何なのかについて復習します。

位相を一言で説明すると、信号の進んだ距離のことです。図1を見てください。「信号くん」が丸型のトラックを走っています。この円周の長さは、「 $2\pi \times (\text{半径})$ 」ですが、正規化して「 $2\pi$ 」と考えます。信号くんのスタート地点を0とすると、彼がこのトラックを1周すると $2\pi$ の距離を進んだこととなります。そして、2周すれば $4\pi$ 進んだこととなります。



この円形のトラックの円周は $2\pi r$ 。rで割って「正規化」すると円周は $2\pi$ 。  
0からスタートして1周すると進んだ距離は $2\pi$ 。2周なら $4\pi$ だ

図1 位相とは…「信号くん」が進んだ距離  
円形のトラック上を一定速度で走り続けている「信号くん」を考える。

- 周波数とは何か

ここで、信号くんがトラックを1周する速さ $\omega$ を考えることにしましょう。速さは、距離を時間 $t$  [s] で割ればよいため、

$$\omega = \frac{2\pi}{t}$$

です。

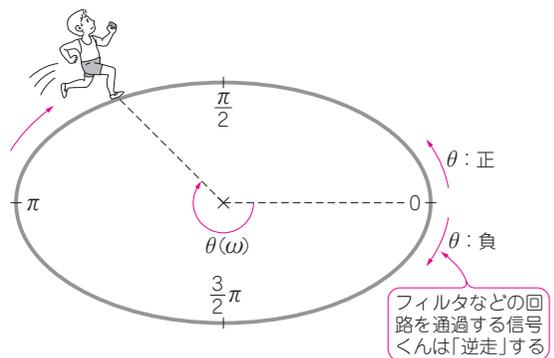
ここで、 $(1/t)$ は周波数 $f$ にほかなりません。従って、この式は次のように書き換えられます。

$$\omega = 2\pi f$$

$2\pi f$ は、 $\omega$ と表記される角周波数です。つまり、角周波数とは信号くんがトラックを1周する速さのことなのです。

- 位相遅延とは何か

位相遅延という概念について考えてみます。先ほど、



信号くんの足の速さは $2\pi f = \omega$   
信号くんの進んだ距離は $\theta(\omega)$   
信号くんが走り始めてからの時間は  $\frac{\text{距離}}{\text{時間}}$  なので  $\frac{\theta(\omega)}{\omega}$  になる。  
ただ、信号くんは逆走しているため、経過時間は負の値で考えて、  
 $-\frac{\theta(\omega)}{\omega}$  となる。

図2 位相遅延とは…「信号くん」が走った時間  
逆走すると遅れが大きくなる。



## 第9章 遮断特性の急峻な フィルタ回路を作るために

ステップ3

# チェビシェフ型ロー・パス・ フィルタの設計

周波数成分とその振幅(周波数スペクトラム)に情報が含まれている信号は、オシロスコープで観測した信号波形が変形していても問題になりません。チェビシェフ・フィルタは、パルス信号には不向きですが、その代わりに、第7章や第8章で紹介したフィルタよりも急峻に信号帯域外成分(雑音や高調波ひずみ)を減衰させることができます。

### ● 急峻なフィルタが必要なら最初にチェビシェフ型を検討する

チェビシェフLPFは、アクティブLPFとして簡単に実現できる減衰傾度の急峻なフィルタです。

フィルタ回路のゲインが減衰する傾き(減衰傾度)が急峻なフィルタが必要になった場合は、まずチェビシェフ型を検討しましょう。なぜなら、このLPFは、表1を使うことで、今までのLPFと同じように簡単に設計できるからです。

エリプティック(連立チェビシェフ)型LPFも減衰傾度が急峻なフィルタとして使われます。しかし、エリプティックLPFをOPアンプで構成しようとすると回路規模が大きくなりがちです。そのため、私はコイルとコンデンサを使用したLC構成のエリプティックLPFしか設計したことがありません。そこで、本書

ではエリプティックLPFの設計方法については割愛します。もし設計しなければならない場合は、第7章最後の参考文献(3)などに付属の設計ソフトウェアを使用すると便利です。

ここで、エリプティック型が説明されていないことで不安を感じる方もいるかもしれません。しかし、安心してください。ほとんどの場合、チェビシェフLPFで十分です。まれに、通過帯域と減衰域の周波数がとても近く、減衰量も十分に確保したい場合にエリプティック型が必要になる程度です。

ところで、チェビシェフ型は、通過帯域内リップルの大きさによって $f_n$ と $Q_n$ が変化します。表に無い通過帯域内リップルのフィルタを設計するには、すでに紹介した設計ツールFilterProや、95頁の参考文献(5)に付属のソフトウェアなどを使用するとよいでしょう。

表1<sup>(1)</sup> チェビシェフLPFの正規化表

ここに挙げたのは2例だけだが、フィルタの専門書には許容リップルの異なる多数の表が掲載されている。

Appendix Dも参照。

次数		$f_n$		$Q_n$
4次	$f_1$	0.78926	$Q_1$	0.61880
	$f_2$	1.15327	$Q_2$	2.18293
5次	$f_1$	0.53891	$Q_1$	0.5
	$f_2$	0.79745	$Q_2$	0.91452
	$f_3$	1.09313	$Q_3$	3.28201
6次	$f_1$	0.51319	$Q_1$	0.59946
	$f_2$	0.83449	$Q_2$	1.33157
	$f_3$	1.06273	$Q_3$	4.63290
7次	$f_1$	0.37678	$Q_1$	0.5
	$f_2$	0.57464	$Q_2$	0.84640
	$f_3$	0.86788	$Q_3$	1.84721
	$f_4$	1.04520	$Q_4$	6.23324
8次	$f_1$	0.38159	$Q_1$	0.59318
	$f_2$	0.64514	$Q_2$	1.18296
	$f_3$	0.89381	$Q_3$	2.45282
	$f_4$	1.03416	$Q_4$	8.08190

(a) リプル0.1 dB

次数		$f_n$		$Q_n$
4次	$f_1$	0.59700	$Q_1$	0.70511
	$f_2$	1.03127	$Q_2$	2.94055
5次	$f_1$	0.36232	$Q_1$	0.5
	$f_2$	0.69048	$Q_2$	1.17781
	$f_3$	1.01773	$Q_3$	4.54496
6次	$f_1$	0.39623	$Q_1$	0.68364
	$f_2$	0.76812	$Q_2$	1.81038
	$f_3$	1.01145	$Q_3$	6.51285
7次	$f_1$	0.25617	$Q_1$	0.5
	$f_2$	0.50386	$Q_2$	1.09155
	$f_3$	0.82273	$Q_3$	2.57555
	$f_4$	1.00802	$Q_4$	8.84180
8次	$f_1$	0.29674	$Q_1$	0.67657
	$f_2$	0.59887	$Q_2$	1.61068
	$f_3$	0.86101	$Q_3$	3.46567
	$f_4$	1.00595	$Q_4$	11.5308

(b) リプル0.5 dB

第 10 章 低域で減衰するフィルタ回路を作るために

ステップ 4

# バターワース型ハイ・パス・フィルタの設計

本章では、第 7 章で設計した LPF と同じ遮断周波数と次数でバターワース型 HPF の設計過程を確認します。実験については、LPF の場合と同様に多重帰還型 HPF についてだけ行います。

低域で信号を減衰させたいときに、ハイ・パス・フィルタ (HPF) が使用されます。なお、私自身は AC カップリング程度の HPF を除き、専用の HPF の必要に迫られたことがありません。

## バターワース 5 次 HPF の設計例

● 基本になる VCVS 型 2 次 HPF と 5 次 HPF の作り方

図 1 に VCVS 型の 2 次 HPF 回路を示します。LPF と同様、この形が基本になります。1 次 HPF と 2 次 HPF を組み合わせて 5 次 HPF を構成すると、図 2 のようになります。

● LPF を設計したときと同じ表が使える

設計には、第 7 章の LPF と同じ正規化表を使います。ただし、設計周波数  $f_n$  には、表の値の逆数を使用します。各段の設計過程を示したものを図 3 に示します。

● 部品の選び方

受動部品の選び方は LPF と同じです。OP アンプについても、LPF と同様に  $GB$  積と各段の  $Q$  に注目して

OP アンプを選びます。必要な  $GB$  積を求める式も LPF のときと同じ式が使用できます。ただし、 $f_{Cn}$  を求める式が LPF の場合は、

$$f_{Cn} = f_n \times f_0$$

ただし、 $f_n$  は表から読み取ったスケーリング係数、 $f_0$  はフィルタ全体の設計周波数

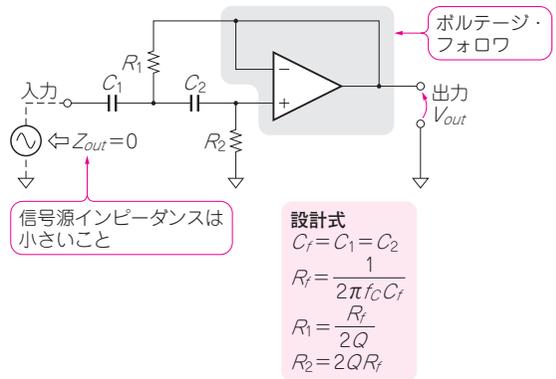


図 1 高次のフィルタを作る場合でも基本となる 2 次の VCVS 型 HPF  
信号源インピーダンスが小さいことが条件になる。

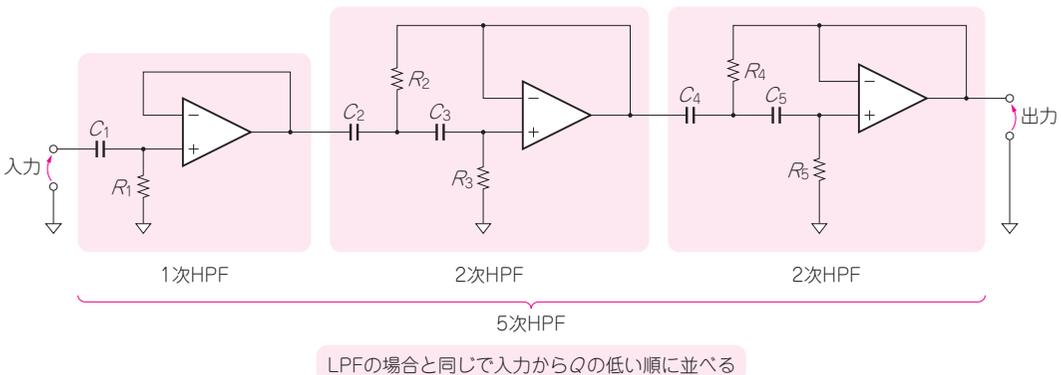
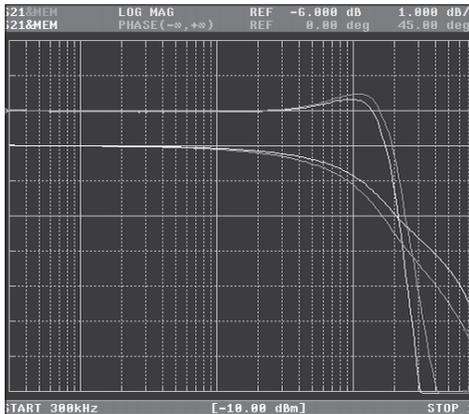


図 2 5 次 HPF を設計してみよう  
5 次のフィルタは 1 次と 2 次の組み合わせに分解できる。



## 第 11 章 フィルタ IC の実験回路を組み立てよう

# アナログ・フィルタ IC の使いかた

本章では、ノイズ除去や高調波除去などでもっとも頻繁に使用されるロー・パス・フィルタ (LPF) を実現するアナログ・フィルタ IC について実験していきます。

本章では Introduction III で紹介したアナログ・フィルタ IC の使いかたについて解説します。

### アナログ・フィルタ IC の評価回路

アナログ・フィルタ IC の評価回路を見ながら、基本的な使いかたを見ていきましょう。

#### ● MAX7418/19/20/21

MAX7418/19/20/21 (マキシム) の基本的な使いかたを図 1 に示します。また、実験基板に実装したようすを写真 1 に示します。

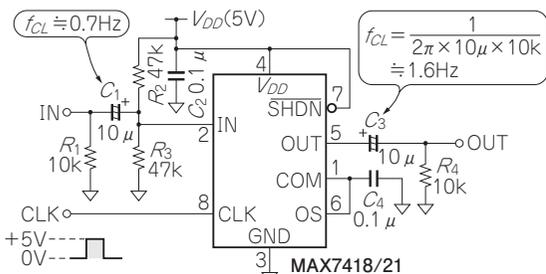
MAX7418 と MAX7421 はエリプティック特性のフィルタです。この二つのフィルタの違いは、減衰域の幅  $r = f_S/f_C$  が違うことです。 $r$  の値が小さい MAX7421

のほうが減衰傾度が急峻になっています。しかし、阻止域での減衰量は逆に MAX7418 のほうが大きくなっています。このように、エリプティック・フィルタでは、減衰傾度 (フィルタのきれ) と減衰量は相反する関係にあります。なお、MAX7419 はベッセル特性、MAX7420 はバターワース特性です。

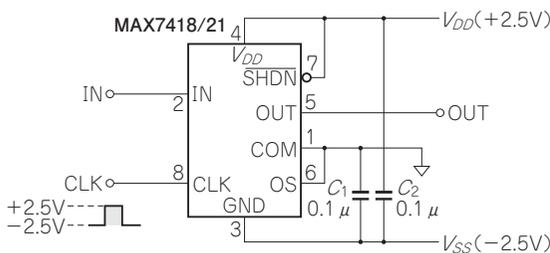
MAX7418/19/20/21 は、単電源で使うこともできますが、入力信号が電源電圧よりも負電圧側に振れると正常に動作しません。そこで、図 1(a) のように入力に正電圧 ( $V_{DD}/2$ ) のバイアスを掛けて使うとよいでしょう。

両電源で使用する場合は、図 1(b) のようにします。この場合は、入力信号の符号が正負に変化する通常の交流信号でも問題ありません。ただし、クロック信号にも、 $V_H = +2.5\text{V}$ 、 $V_L = -2.5\text{V}$  の信号が必要になります。

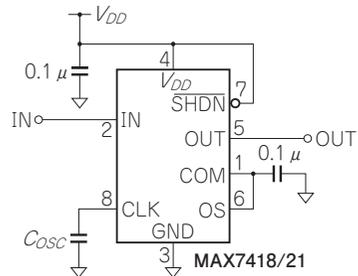
このクロック信号を得るために、コラムに書いたようなレベル・シフト回路を試してみたのですが、正常動作しませんでした。おそらく、ドライブ能力が不足



(a) 単電源で外部発振器を使う場合



(b) 両電源で外部発振器を使う場合

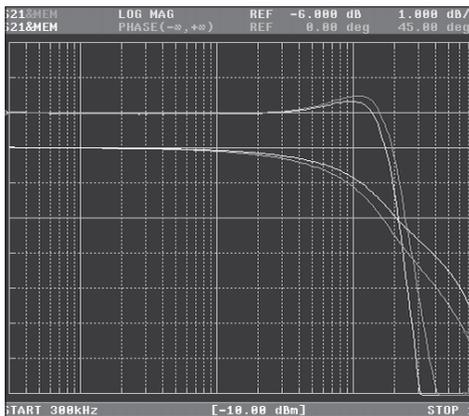


$$C_{osc}[\text{pF}] = \frac{k}{f_{osc}[\text{kHz}]}$$

MAX7418, MAX7421 の場合、 $k = 87 \times 10^3$   
 MAX7419, MAX7420 の場合、 $k = 110 \times 10^3$

(c) 内部発振器を使う場合

図 1 MAX7418/19/20/21 の基本的な使いかた  
 クロック周波数はカットオフ周波数の 100 倍に設定する。



## 第12章 いろいろな周波数特性をネットワーク・アナライザを使って確認 アナログ・フィルタ IC を評価する

アナログ・フィルタ IC に関して評価すべき特性は、周波数特性と群遅延特性です。なぜ群遅延特性を評価しておくかという、この群遅延量の振幅値（ピーク・ツー・ピーク値）から、信号を時間軸で観測したときの波形ひずみの大きさを相対比較することができるからです。

### 測定方法

#### ● 周波数特性と群遅延特性を評価する方法

ゲイン周波数特性や群遅延特性は、ネットワーク・アナライザを使うことで簡単に測定することができます。ゲイン周波数特性を測定するだけであれば、トラッキング・ジェネレータ(TG)付きのスペクトラム・アナライザでも可能ですが、群遅延特性などの「位相」が絡む測定になると通常はできません(昔のスペクトラム・アナライザには位相特性や群遅延特性の測定が可能な機種もありましたが…)

実験に使用した測定システムを図1に示します。バッファ・アンプは、LT1568を使用したフィルタを評価するときだけ使用しました。これは、フィルタ回路の抵抗の定数が小さく、ネットワーク・アナライザの出力インピーダンス  $50\Omega$  がフィルタの特性に影響を与えていたからです。

バッファ・アンプには、図2に示すように、MAX4108(マキシム)を使用したボルテージ・フォロワを使いました。

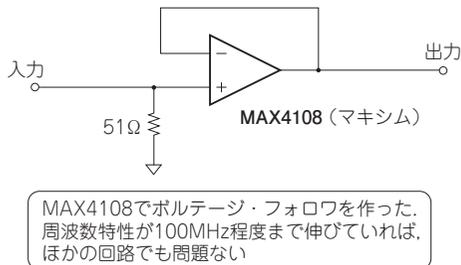


図2 LT1568を使ったフィルタを評価するときに使ったバッファ・アンプの回路

#### ● スイッチト・キャパシタ・フィルタの出力スプリアス

スイッチト・キャパシタ・フィルタ(SCF)の出力にフィルタがないとどうなるかを見るために、図3の方法で、出力信号に含まれるクロック成分を観測しました。

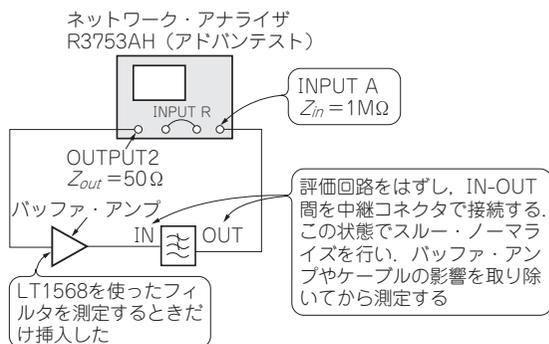


図1 フィルタのゲイン-周波数特性と群遅延特性の評価方法

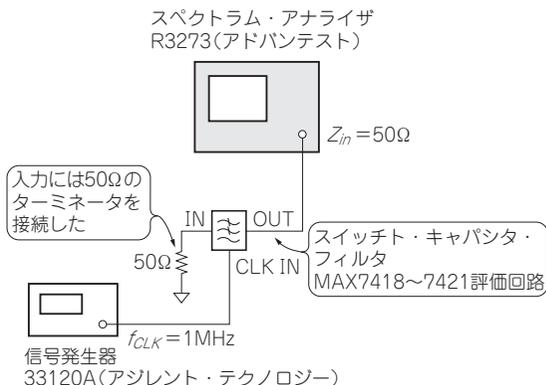


図3 スイッチト・キャパシタ・フィルタの出力残留クロック成分の測定方法

**CQ出版社**

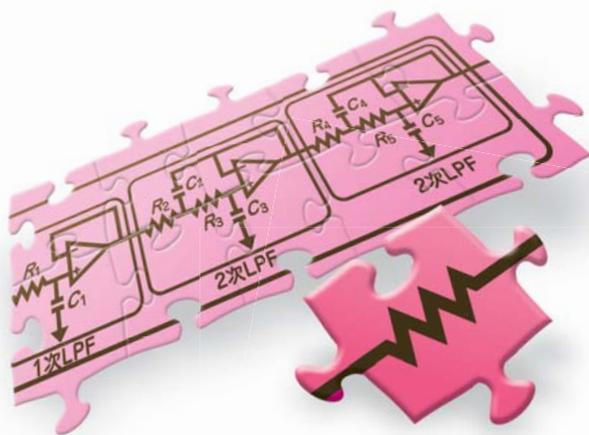
# 見本

このPDFは、CQ出版社発売の「やりなおしのための実用アナログ回路設計(SP No.122)」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/MSP/MSP201304.htm>

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



## トランジスタ技術 SPECIAL