

# SPICE

## 実用電子回路講座



### 第6回 位相をコントロールして負帰還を安定化する

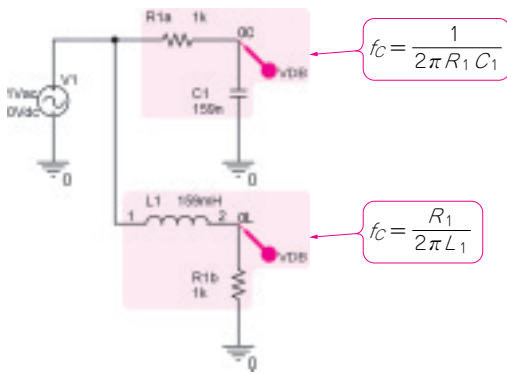
遠坂 俊昭  
Toshiaki Enzaka

電子回路の設計では、周波数に対する回路の応答、すなわちゲインと位相の周波数特性が重要なテーマになります。負帰還増幅器を設計する際にしばしば遭遇する異常発振も、OPアンプ自体や抵抗/コンデンサで構成されている帰還回路のゲインと位相の周波数特性が深く関与しています。負帰還設計の基本となるのは、抵抗(R)、コイル(L)、コンデンサ(C)という基

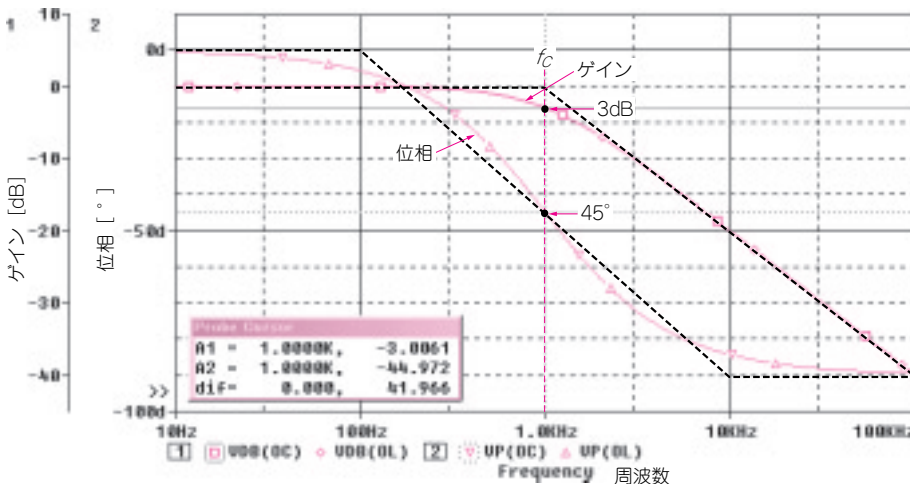
本素子で構成されるRLC回路の周波数特性をよく理解することです。コンピュータが自由に使えなかった先輩たちは、RLC回路の周波数応答を正規化グラフ(万能曲線)にプロットしながら、安定に動作する負帰還回路の定数を算出していました。

現在はPSpiceやSIMetrixを始めとする電子回路シミュレータが簡単に入手でき、高性能なパソコンを使って手軽に解析できるので、万能曲線など不要かのように思われます。しかし、ここに大きな落とし穴があります。というのは、現代のどんなに高性能なパソコンもシミュレータも、回路の解析はしてくれても、自分がほしい回路を考え出してくれることはないからです。

最適な負帰還回路を設計するためには、RLCを組み合わせたシンプルな回路のゲインと位相がどんな周波数変化をするのか、頭のなかで即座にイメージできることが大切です。そこで今回は、抵抗、コンデンサ、コイルだけで構成された回路や、それらとOPアンプを組み合わせた増幅回路を例に、ゲインと位相の周波数特性を見ていきます。



(a) 回路



(b) ゲインと位相の周波数特性

図6-1 周波数が高くなると位相が遅れるLPFのシミュレーション

## シンプルな回路で 位相の周波数変化をしてみる

### ■ 位相が遅れたり、進むだけの回路

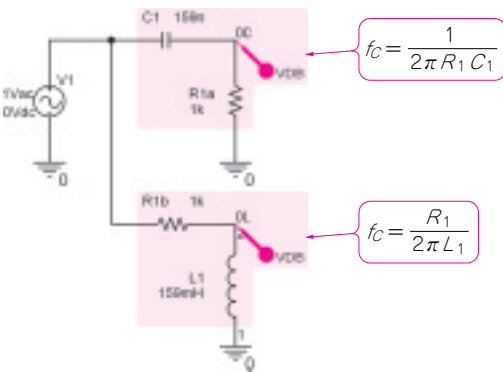
#### ● 位相が遅れていく回路

図6-1に示すのは、LPF(Low Pass Filter)です。

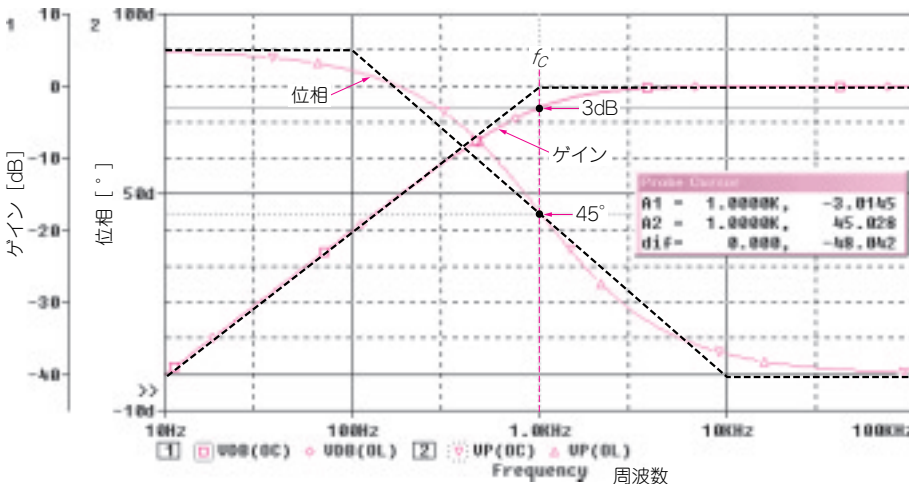
シャ断周波数 $f_c$ において、ゲインは $-3\text{dB}$ 、位相は $45^\circ$ 遅れます。それ以上の周波数では $90^\circ$ に接近しますが、 $90^\circ$ 以上になることはありません。

図6-1に示すシャ断周波数は、極(pole)と呼ばれます。ゲイン [dB] と位相 [°] の周波数特性を1枚のグラフに表したものを負帰還技術の普及に貢献したHendrik W. Bode氏にちなみ、ボード線図と呼んでいます。

ゲインも位相も、実際の周波数特性をグラフに描くと滑らかな曲線になりますが、設計するときは漸近線を描きます。漸近線で描いたグラフを骨格ボード線図と呼びます。図6-1に示すように、位相もシャ断周



(a) 回路



(b) ゲインと位相の周波数特性

図6-2 周波数が高くなると位相が進む HPF のシミュレーション

波数の1/10と10倍の点を直線で結んで表すことができます。

#### ● 位相が進んでいく回路

図6-2は、HPF(High Pass Filter)です。図6-1と同様に、シャ断周波数 $f_c$ においてゲインが $-3\text{dB}$ になり、位相は $45^\circ$ 進みます。

### ■ いったん遅れたり進んだ位相が戻ってくる回路

#### ● いったん遅れた位相が戻ってくる回路

図6-3に示すのは、ゲインの周波数特性が階段状(ステップ特性)になるLPFの回路とそのゲインと位相の周波数特性です。

図6-3(b)に示すように、ゲインの周波数特性の変化点は2か所( $f_1$ と $f_2$ )あり、位相はいったん遅れますが、その後 $0^\circ$ に向かいます。この位相の戻りを利用するのが、安定した負帰還増幅器を設計するためのポイントになります。位相遅れは、ゲインの傾斜が最も急峻になる部分で最大になります。図6-3(c)では、 $10\text{kHz}$ でのゲインが $2\text{dB}$ おきに変化するよう、 $R_1$ を変化させて解析した結果です。 $R_1$ が大きいくほど、減衰量と位相遅れが大きくなるのがわかります。

$f_1$ と $f_2$ が10倍以上離れている場合( $f_2 > 10f_1$ )は、図6-1と同様にゲインが漸近線から $3\text{dB}$ 程離れた点に位置しますが、 $f_1$ と $f_2$ が近づくとこの関係は崩れてきます。

このように回路はシンプルでも、手作業で位相やゲインの周波数特性を正確に求めるのは簡単ではありませんから、シミュレータを活用するのが現実的です。