

# StudentZone—2020年7月

## エミッタ接地回路の周波数応答

著者：Doug Mercer、コンサルティング・フェロー  
 Antoniu Miclaus、システム・アプリケーション・エンジニア

### 目的

今回は、バイポーラ・トランジスタ (BJT) を使用して構成したエミッタ接地回路の周波数応答について検討します。

### エミッタ接地回路のトポロジ

図1に示したのは、代表的なエミッタ接地回路 (共通エミッタ・アンプ) です。コンデンサ  $C_C$  と  $C_B$  は、それぞれ入力と出力をアンプ回路のDCバイアスから分離する (ACカップリング) ために使用しています。コンデンサ  $C_E$  はACバイパス・コンデンサであり、トランジスタQ1のエミッタにおいて低周波領域のACグラウンドを確立する役割を果たします。ミラー・コンデンサ  $C_F$  は、アンプ回路の高周波側において3dBの応答を調整するために使用する小容量のコンデンサです。

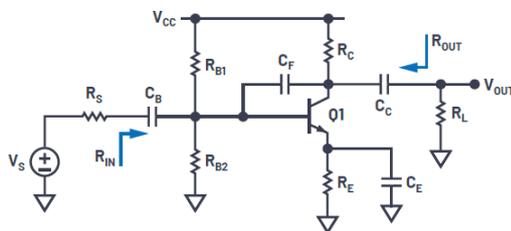


図1. 代表的なエミッタ接地回路

### 低周波領域の応答

図2に示したのは、図1の回路の低周波領域の動作に対応する小信号等価回路です。低周波領域では、 $C_F$  のインピーダンスが非常に高いと考えられます。そのため、 $C_F$  は無視できます。また、 $R_B$  は、図1の  $R_{B1}$  と  $R_{B2}$  を並列に合成したものです。

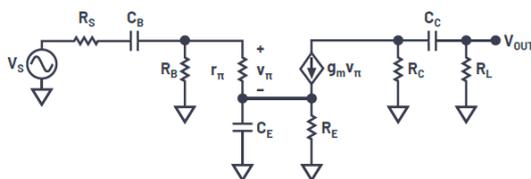


図2. 低周波領域に対応する小信号等価回路

短絡回路の時定数解析を使うことで、低周波側の3dB周波数  $\omega_L$  を次式のように求めることができます。

$$\omega_L \approx \frac{1}{R_{1S}C_B} + \frac{1}{R_{2S}C_E} + \frac{1}{R_{3S}C_C} \quad (1)$$

ここで  $R_{1S}$ 、 $R_{2S}$ 、 $R_{3S}$  は、それぞれ以下のように表されます。

$$R_{1S} = R_S + (R_B \parallel r_\pi) \quad (2)$$

$$R_{2S} = R_E \parallel \left( \frac{r_\pi + (R_B \parallel R_S)}{\beta + 1} \right) \quad (3)$$

$$R_{3S} = R_C \parallel R_L \quad (4)$$

### 高周波領域の応答

図3に示したのは、図1の回路の高周波領域の動作に対応する小信号等価回路です。高周波領域では、 $C_B$ 、 $C_C$ 、 $C_E$  のインピーダンスは  $R_S$ 、 $R_L$ 、 $R_E$  と比べて非常に小さくなります。そのため、それぞれを短絡回路に置き換えることができます。

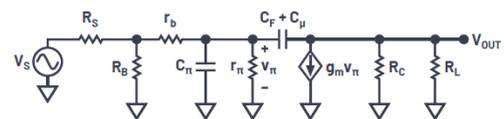


図3. 高周波領域に対応する小信号等価回路

高周波側の3dB周波数  $\omega_H$  は、次式によって求められます。

$$\omega_H \approx \frac{1}{R_T \left[ C_\pi + (C_\mu + C_F) \left( 1 + g_m R_{CL} + \frac{R_{CL}}{R_T} \right) \right]} \quad (5)$$

ここで  $R_T$ 、 $R_{CL}$  は、それぞれ以下の式で表されます。

$$R_T = r_\pi \parallel (r_b + (R_S \parallel R_B)) \quad (6)$$

$$R_{CL} = R_C \parallel R_L \quad (7)$$

このように、エミッタ接地回路の動作が低周波側／高周波側のドミナント・ポールによって適切に特徴付けられるのであれば、この回路の周波数応答は、次式のように近似できます。

$$\frac{v_O}{v_S}(s) = A_v \frac{s}{s + \omega_L} \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_H}} \quad (8)$$

各変数の意味は以下のとおりです。

s：複素角周波数

$A_v$ ：ミッドバンドにおけるゲイン

$\omega_L$ ：低周波側のコーナー角周波数

$\omega_H$ ：高周波側のコーナー角周波数

## 回路の設計

ここでは、エミッタ接地回路を具体的に設計してみます。まず、 $C_B$ 、 $C_C$ 、 $C_E$ はいずれも1F、 $C_F$ 、 $C_{\pi}$ 、 $C_{\mu}$ はいずれも0Fだと仮定します。トランジスタQ1としては「2N3904」を使用することにします。それ以外の仕様は以下のとおりです。

$$V_{CC} = 5V$$

$$R_S = 50 \Omega$$

$$R_L = 1k \Omega$$

$$R_{IN} > 250 \Omega$$

$$I_{SUPPLY} < 8mA$$

$$A_v > 50$$

[ピークtoピークの出力振幅 (クリップは発生させない)] > 3V

以下の手順で設計／検証を行ってください。

- ▶ 計算結果、設計手順、各部品の最終的な値はすべて記録しておいてください。
- ▶ 回路シミュレータとして「LTspice®」を使用し、回路の特性を検証します。仕様を満たしていることを示すために必要なすべてのシミュレーション結果は、プロットとして取得します。また、DC バイアスポイントが記入された回路図も用意してください。
- ▶ LTspice を使用し、 $C_F$  が 0F という条件で高周波側の 3dB 周波数を確認します。

- ▶ シミュレーションの動作点データを基にして、トランジスタの  $C_{\pi}$ 、 $C_{\mu}$ 、 $r_b$  を求めます。また、式 (5) ~ (7) を使って  $f_H$  を算出します。これらの式で得られるのは角周波数なので、単位が Hz の周波数値に変換する必要があります。この計算結果を、上のステップで得られたシミュレーション結果と比較してください。
- ▶  $f_H$  が 5kHz になる  $C_F$  の値を算出します。シミュレーションによって特性を確認し、必要があれば  $C_F$  の値を調整します。
- ▶  $f_L$  が 500Hz になる  $C_B$ 、 $C_C$ 、 $C_E$  の値を算出します。シミュレーションによって特性を確認し、必要があれば各コンデンサの値を調整します。

## 実験の手順

次に、設計した回路をブレッドボード上に実装します。回路の周波数応答を実際に測定することで、設計した値の検証を行います。

## 準備するもの

- ▶ アクティブ・ラーニング・モジュール「ADALM2000」
- ▶ ソルダレス・ブレッドボード
- ▶ 抵抗：6 個。アナログ・パーツ・キット「ADALP2000」から必要な値のものを選択します。
- ▶ コンデンサ：4 個。ADALP2000 から必要な値のものを選択します。
- ▶ 小信号 NPN トランジスタ：「2N3904」(1 個)

ソース抵抗  $R_S$  と ADALM2000 の任意波形ジェネレータ (AWG) については注意すべきことがあります。AWG の出力 W1 には、50  $\Omega$  の直列抵抗が存在します。したがって、W1 と直列に接続する外付け抵抗には、その値も含める必要があります。また、設計した回路は比較的ゲインが高いので、入力信号のピーク to ピーク振幅は約 100mV 程度に抑えなければなりません。この場合、ノイズ対策の観点から、ソフトウェア・ベースで AWG の出力値を小さく設定するのではなく、AWG の出力とエミッタ接地回路の入力間に、信号を減衰させるための抵抗分圧器を挿入するとよいでしょう。図 4 に示すような回路を使えば、1/16 の減衰と 60  $\Omega$  相当のソース抵抗の両方が得られます。ここでは値が 68  $\Omega$  の標準抵抗を使用していますが、別の値の標準抵抗を組み合わせることも可能です。

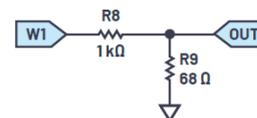


図 4. ソース抵抗が 68  $\Omega$  の減衰回路

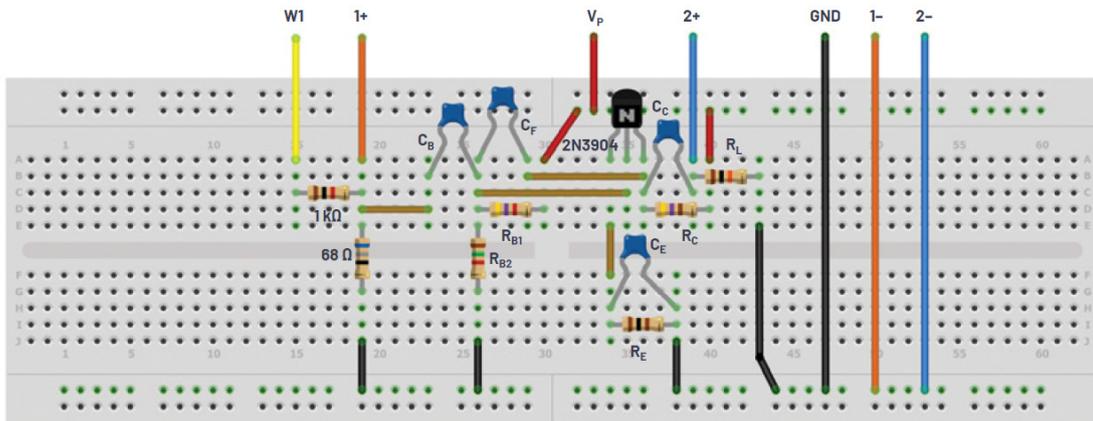


図6. 図5の回路を実装したブレッドボード

## ハードウェアの設定

図5に示したのが、設計した回路と図4の回路を組み合わせた結果です。ブレッドボードを使用し、この回路を図6のように実装します。

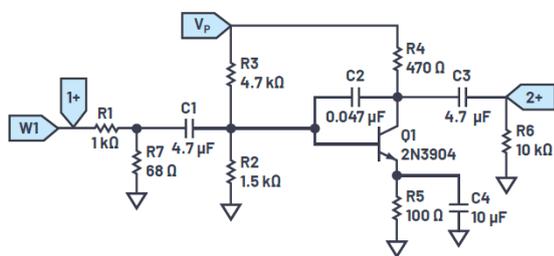


図5. 測定に使用するエミッタ接地回路

## 説明

- ▶ 設計値に基づいて、図5の回路を構成します。実際に使用する部品については、ADALP2000に含まれる標準品の中で最も値に近いものを選択してください。なお、標準品を直列／並列に組み合わせれば、より設計値に近い値の部品を得ることもできます。
- ▶  $I_C$ 、 $V_E$ 、 $V_C$ 、 $V_B$ を測定することによって、DC動作点を確認します。DCバイアス値がシミュレーションから得られた値と大きく異なる場合には、次のステップに移る前に、必要なDCバイアスが得られるよう回路を修正します。
- ▶  $I_{SUPPLY}$ を測定します。
- ▶ ソフトウェア・パッケージ「Scopy」のネットワーク・アナライザ計測機能を使用し、50Hz～20kHzの周波数応答（振幅）を測定します。それにより、低周波側／高周波側の3dB周波数  $f_L$  /  $f_H$ の値を特定します。
- ▶ ミッドバンドの周波数領域で  $A_V$ 、 $R_{IN}$ 、 $R_{OUT}$ を測定します。

図7、図8に示したのは、LTspiceを使って取得した図5の回路のシミュレーション結果です。

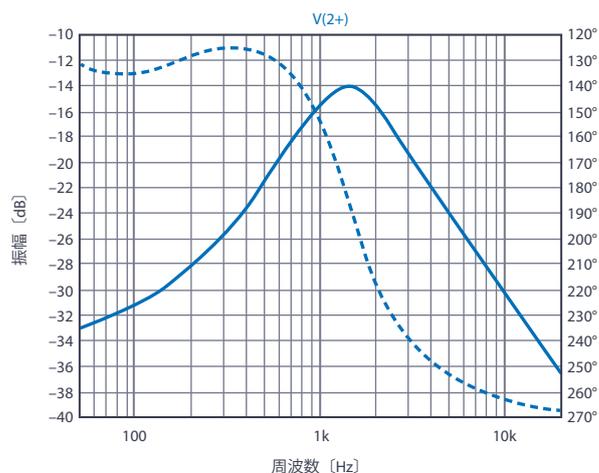


図7. LTspiceによるシミュレーション結果（その1）。 $C_F$ が $0.047\mu F$ という条件で、AC掃引を行った結果をプロットしています。

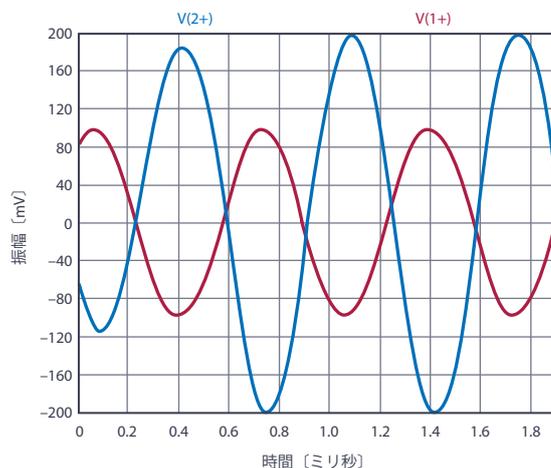


図8. LTspiceによるシミュレーション結果（その2）。 $C_F$ が $0.047\mu F$ という条件で、周波数が1.5kHzの信号を入力した場合の出力をプロットしました。

## 問題

コンデンサ  $C_F$  をより小さい値 ( $0.01\mu F$ ) のものに置き換えます。その条件で、AC掃引のシミュレーション結果と、ネットワーク・アナライザ計測機能を使用した実測結果を取得してください。コンデンサの値を変更したことで現れる影響について説明してください。

答えは [StudentZone](#) で確認できます。



### 著者について

Doug Mercer ([doug.mercer@analog.com](mailto:doug.mercer@analog.com)) は、1977年にレンセラー工科大学で電気電子工学の学士号を取得しました。同年にアナログ・デバイセズに入社して以来、直接または間接的に30種以上のデータ・コンバータ製品の開発に携わりました。また、13件の特許を保有しています。1995年にはアナログ・デバイセズのフェローに任命されました。2009年にフルタイム勤務からは退きましたが、名誉フェローとして仕事を続けており、Active Learning Programにもかかわっています。2016年に、レンセラー工科大学 電気/コンピュータ/システム・エンジニアリング学部のEngineer in Residenceに指名されました。



### 著者について

Antoniu Miclaus ([antoniu.miclaus@analog.com](mailto:antoniu.miclaus@analog.com)) は、アナログ・デバイセズのシステム・アプリケーション・エンジニアです。アカデミック・プログラムや、Circuits from the Lab<sup>®</sup>向けの組み込みソフトウェア、QAプロセス・マネジメントなどに携わっています。2017年2月から、ルーマニアのクルジュナポカで勤務しています。現在、バベシュボヨイ大学においてソフトウェア・エンジニアリングに関する修士課程にも取り組んでいます。また、クルジュナポカ技術大学で電子工学と通信工学の学士号を取得しています。