

# SPICE

## 実用電子回路講座



### 第19回 トランジスタで作る超低雑音アンプ その2

遠坂 俊昭  
Toshiaki Enzaka

前回(第18回, 2006年8月号)は, トランジスタの基本動作と性質について説明しました. 今回は, 電子回路シミュレータPSpiceを使った, ディスクリート・アンプの雑音特性解析の前準備として, 雑音パラメータを含むトランジスタ・モデルを作ります.

#### トランジスタの等価回路と PSpiceモデル

##### ● バイポーラ・トランジスタの場合

図19-1に示すのは, 雑音源を含むトランジスタの等価回路です. 交流での等価回路を示しているため電源は含まれていません. 電源は交流的にグラウンドになります.

ベース-エミッタ間に信号が加わると, その電圧に  $g_m$  を乗じた値のコレクタ電流が流れます.  $r_\pi$  は, ベース-エミッタ間に電圧が加わると電流が流れることを表現するための抵抗です. 実際に存在するわけではなく, その値も動作点によって変化します.

$R_B$ ,  $R_C$ ,  $R_E$ からは雑音(熱雑音)が発生します.  $i_{Bn}$  と  $i_{Cn}$  は雑音電流源を示し, PSpiceでは次式でその値

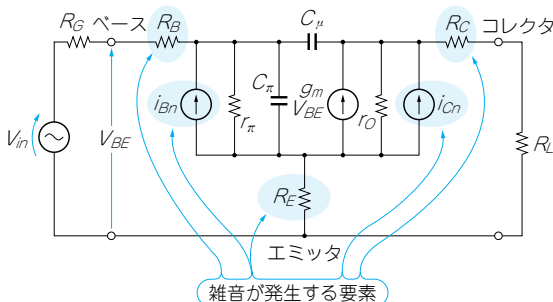


図19-1 雑音が発生する要素を考慮したトランジスタの等価回路  
 $R_B$ ,  $R_C$ ,  $R_E$ から熱雑音が発生する.  $i_{Bn}$  と  $i_{Cn}$  は雑音電流源を示す

を決定しています.

$$i_{Bn} = \sqrt{2qI_B + K_f \frac{I_B^{A_f}}{f}}$$

$$i_{Cn} = \sqrt{2qI_C}$$

ただし,  $q$ : 電子の電荷,  $I_B$ : ベース電流,  $K_f$ : フリッカ・ノイズ係数,  $A_f$ : フリッカ・ノイズ指数,  $f$ : 周波数,  $I_C$ : コレクタ電流

PSpiceのトランジスタ・モデルでは, ベース雑音電流にショット雑音とフリッカ雑音が含まれていますが, コレクタ雑音電流にはショット雑音しか含まれません.

$K_f$ の値で  $1/f$  雑音であるフリッカ雑音の量が決定され, 通常  $A_f$ の値は1に設定します.

ベース電流とコレクタ電流に含まれるショット雑音は, ベースやコレクタの電流値で一義的に決定されます. したがってショット雑音の量は,  $R_B$ ,  $R_C$ ,  $R_E$ の抵抗でモデリングし, 通常は  $R_B$ の値で設定します.

##### ● 接合型FETの場合

図19-2は, 接合型FETの等価回路です.  $g_{GS}$  と  $g_{GD}$  はゲート漏れ電流を決定するだけで, 熱雑音は発生しません.

PSpiceでは接合型FETの入力雑音電流はモデリングされていません.

$R_D$  と  $R_S$  は熱雑音を発生します.  $i_{Dn}$  がドレイン雑音電流源を示し, PSpiceでは次式でドレイン雑音電流の値が決定されます.

$$i_{Dn} = \sqrt{\frac{2kTg_m}{3} + K_f \frac{I_D^{A_f}}{f}}$$

ただし,  $k$ : ボルツマン定数,  $T$ : 絶対温度

PSpiceでは, トランジスタと同様に接合型FETのフリッカ雑音の量は  $K_f$  で, ショット雑音の量は  $R_D$  と  $R_S$  でモデリングします.

#### Keywords

フリッカ雑音, 接合型FET, PSpice, 2SC3329, 2SA1316, ノイズ・フィギュア・チャート, 2SK369, PSpice Model Editor Lite

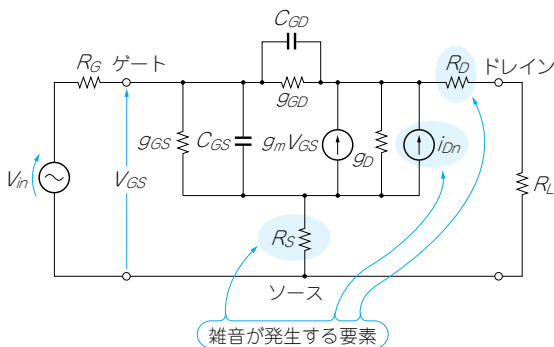


図19-2 雑音が発生する要素を考慮した接合型FETの等価回路  
 $R_D$ と $R_S$ から熱雑音が発生する。 $I_{Dn}$ はドレイン雑音電流源を示す

## 雑音パラメータを含む トランジスタ・モデルの作成

### トランジスタ2SC3329のモデリング

● データシートからモデリングに必要な雑音特性を調べ出す

2SC3329は、MCヘッド・アンプの初段用に作られた低雑音のトランジスタです。コンプリメンタリ・トランジスタは2SA1316です。

2SC3329のデータシートに、各種の条件における入力換算雑音電圧や入力雑音電流の値が記載されていますがよいがありません。

雑音特性をモデリングするとき唯一手がかりになるのは、図19-3に示すノイズ・フィギュア・チャートです。

直流からの増幅に使える低雑音アンプには、2SC3381や2SA1349など、同一ウエハに作られた低雑音デュアル・トランジスタが最適ですが、残念なことに今で

は製造中止です。デュアル・トランジスタやデュアルFETの需要は少ないでしょうが、ディスクリート回路でとても重要なデバイスなので、ぜひ復活してもらいたいものです。

### コレクタ電流の動作点を定める

#### ▶ ショット雑音の推測

図19-3(a)のノイズ・フィギュア・チャートは、周波数1kHzでの値を示しています。ここからショット雑音の量を推測できます。

信号源抵抗が低いときは、コレクタ電流が多いほど雑音が少なくなることがわかります。しかし、コレクタ電流が多くなると当然ベース電流も増加し、ベース電流に含まれている雑音電流が増加します。このため信号源抵抗が1kΩ以上の場合には、コレクタ電流が増加すると入力雑音電流が増加し、雑音特性が悪くなります。

#### ▶ フリッカ雑音の推測

図19-3(b)は、周波数10Hzでの雑音特性なので、 $1/f$ 雑音(フリッカ雑音)の量がわかります。

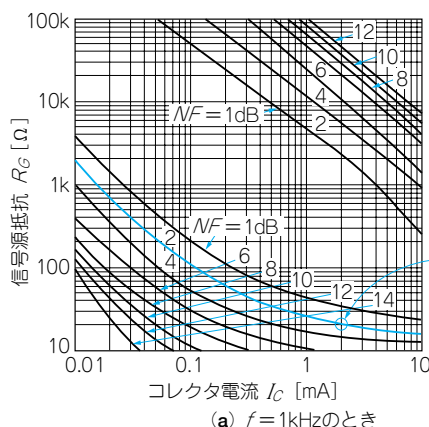
コレクタ電流が2mAのときは、信号源抵抗30Ωでノイズ・フィギュア(NF)が8dBで最低になり、2mA以上では少し悪化しています。

#### ▶ コレクタ電流は2mAに決定

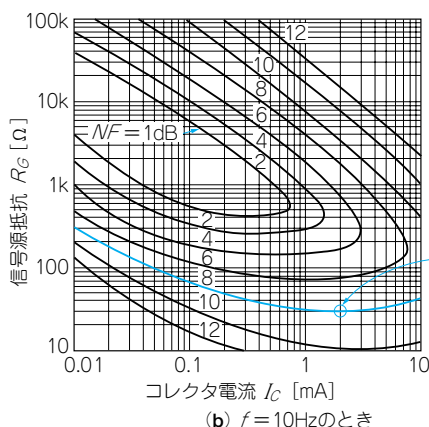
図19-3(a)でも2mAのとき、20Ωで $NF = 2$ dBと比較的良好い値です。

このことから2SC3329ではコレクタ電流2mA程度が雑音の発生が少なく、電力消費も少ないので、試作する低雑音トランジスタ・アンプのコレクタ電流値(動作点)としました。

図19-3(a)の1kHzでのノイズ・フィギュア・チャートから、 $R_G = 20\Omega$  ( $0.575\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ )のとき $NF = 2$ dB(1.26倍)です。したがって入力換算雑音電圧密度



動作点をここ  
 $(R_G = 20\Omega,$   
 $I_C = 2\text{mA})$   
 に決定



動作点をここ  
 $(R_G = 30\Omega,$   
 $I_C = 2\text{mA})$   
 に決定

図19-3 トランジスタ2SC3329のデータシートからモデル化に必要な雑音特性を調べる