

# SPICE

## 実用電子回路講座



### 第16回 増幅器の総合雑音特性「ノイズ・フィギュア」

遠坂 俊昭  
Toshiaki Enzaka

低雑音のトランジスタやFETのデータシートには、必ず「ノイズ・フィギュア」という特性パラメータが記載されています。誤解されやすいのですが、増幅素子の雑音特性を総合的に表す重要なパラメータです。今回はその意味するところを説明します。少しくどい説明になりますがご了承ください。

#### S/Nとは

##### ● 現実の増幅器は必ず S/N を悪化させる

センサなどから信号が発生する場合、同時にセンサの信号源抵抗から熱雑音も発生しています。

信号には必ず雑音が含まれ、信号対雑音の比が決定しています。例えば、信号源抵抗が1kΩのセンサから1mV<sub>RMS</sub>の信号が発生したとします。1kΩの抵抗からは約4nV/√Hzの熱雑音が発生しますから、その比、つまりS/Nは1Hz帯域幅のとき、

$$1 \text{ mV} : 4 \text{ nV} = 250000 : 1$$

になります。10kHz帯域幅の場合は、雑音電圧が√10000倍になるので、

$$1 \text{ mV} : 400 \text{ nV} = 2500 : 1$$

になります。

雑音は信号を不確かなものにするので、このS/Nの値が大きいほど正確で純度の良い信号になります。

センサから出力された信号のS/Nは、どんなにすばらしい増幅器をもってきても、それ以上改善されることはありません。

例えば、100倍の増幅器は、信号源で発生した信号を100倍に増幅します。このとき、信号源で発生した雑音も100倍に増幅され、これに増幅器内で発生した雑音も加わります。したがって、増幅器出力には100倍の信号と、入力雑音の100倍の値以上の雑音が見えます。このように実際の増幅器では、入力のS/Nよ

りも出力のS/Nは必ず悪化します。

##### ● 信号源抵抗は S/N に大きな影響を与える

ノイズ・フィギュアの基準になるのが信号源抵抗です。

信号源抵抗からは熱雑音が発生し、抵抗値が大きいほど大きな雑音が発生します。少し乱暴な言いかたをすると、信号源抵抗が大きいと入力信号のS/Nがもともと悪く、基準になる信号に含まれる雑音が多いのですから、少々増幅器の内部雑音に加わってもS/Nはあまり悪化しません。

しかし、OPアンプの入力雑音電流は、S/Nに大きな影響を与えます。なぜなら、信号源抵抗に流入雑音電流が流れて雑音電圧に変換されるからです。また信号源抵抗が大きいと、増幅器の入力インピーダンスによって、信号成分が分圧されて小さくなり、S/Nを悪化させます。

このように信号源抵抗はS/Nに大きく関わり、増幅器の入力インピーダンス、入力雑音電流の多寡によって、その悪化度合いが異なります。

##### ● S/N を悪化させる三つの要因

雑音が発生しない理想的な増幅器は、信号源の信号電圧と雑音電圧の両者を同じ倍率で増幅するので、入力のS/Nと出力のS/Nは等しくなります。

現実には、増幅器内部で雑音が発生します。その等価回路を図16-1に示します。

前回(連載第15回、2006年5月号)説明したように、増幅器内部で発生する雑音は入力換算雑音電圧 $v_n$ と入力雑音電流 $i_n$ で表せます。また増幅器には、大小はあれ必ず入力抵抗 $R_{in}$ と入力容量 $C_{in}$ があります。

図16-1に、ノイズ・フィギュアの求めかたを示します。後段に接続した理想増幅器のゲインはA、入出

#### Keywords

ノイズ・フィギュア, S/N, NF, ノイズ・ゲイン, 入力浮遊容量, 入力換算雑音電圧, 入力雑音電流

力の S/N は変化しないと仮定します。電圧で S/N を考えると、その悪化要因は次のようになります。

- 入力換算雑音に加わり雑音が増加する
- 入力雑音電流が  $R_S$  と  $R_{in}$ 、 $C_{in}$  に流れて雑音電圧に変換されて加わる
- 信号電圧が  $R_S$  と  $R_{in}$ 、 $C_{in}$  で分圧されて小さくなり増幅器の雑音が増加する

### ● 信号源の抵抗値や増幅器の雑音性能と S/N

同じ増幅器でも、信号源のインピーダンスが異なれば、S/N の悪化具合も異なります。

つまり、どんな増幅器でも信号源インピーダンスが大きいほど S/N は悪化します。そして、入力雑音電流が多く、入力インピーダンスが低い増幅器ほど、信号源インピーダンスが大きくなったときの S/N の悪化が大きくなります。

## ノイズ・フィギュアとは

### ● ノイズ・フィギュアの定義

ノイズ・フィギュアとは、信号源に増幅器を接続し、信号源の S/N が増幅器の出力でどれだけ悪化したかを示すパラメータです。

ノイズ・フィギュア  $NF$  [dB] は次式で求められます。

$$NF = 20 \log \frac{S/N_{out}}{S/N_{in}} \dots\dots\dots (16-1)$$

ただし、 $S/N_{out}$  : 増幅器の出力信号の S/N [倍]  
 $S/N_{in}$  : 増幅器の入力信号の S/N [倍]

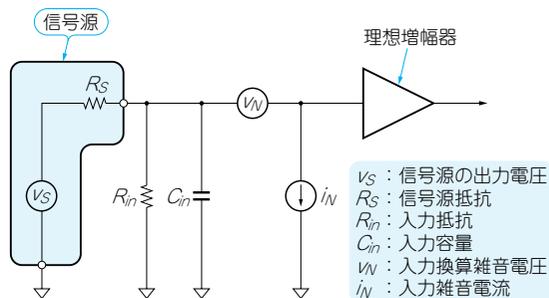
S/N を電力で表す場合は、式 (16-1) の  $20 \log$  を  $10 \log$  に変えます。具体的には図 16-1 に示した式から求められます。

### ● 信号源抵抗を小さくするとノイズ・フィギュアは悪くなるが出力雑音は減る

増幅器の入力換算雑音電圧は変わらなくても、信号源抵抗が小さくなれば信号源で発生する熱雑音が減り、基準になる雑音が小さくなるので、相対的にノイズ・フィギュアは悪化します。信号源抵抗が小さくなると、ノイズ・フィギュアは悪化しますが、出力の雑音電圧は小さくなります。

いくら増幅器の入力換算雑音電圧が小さくても、入力雑音電流が大きかったり、入力インピーダンスが低かったりすると、信号源インピーダンスが高いときのノイズ・フィギュアの悪化具合は大きくなります。

インピーダンスがわかっている信号源に増幅器を接続する場合、増幅器の出力の S/N を最良にするためには、そのインピーダンスにおいてノイズ・フィギュアが一番小さくなる増幅器を選びます。



- 入力部の S/N  
 $S/N_{in} = \frac{V_S}{V_{N(RS)}}$   
 ただし、 $S/N_{in}$  : 信号源の入力信号の S/N、 $V_S$  : 信号源の出力電圧、 $V_{N(RS)}$  : 信号源抵抗の熱雑音電圧
- 出力部の S/N  
 $S/N_{out} = \frac{V_S T_f}{\sqrt{V_{N(RSRin)}^2 + V_N^2 + (I_N R_{Zin})^2}}$   
 ただし、 $S/N_{out}$  : 出力部の S/N、 $T_f$  : 信号源に対する入力伝達関数(後出)、 $R_{Zin}$  : 理想増幅器から見た入力部インピーダンス、 $V_{N(RSRin)}$  :  $R_S // R_{in}$  の熱雑音電圧、 $V_N$  : 入力換算雑音電圧、 $I_N$  : 入力雑音電流
- ノイズ・フィギュア  
 $NF = 20 \log \frac{\sqrt{V_{N(RSRin)}^2 + V_N^2 + (I_N R_{Zin})^2}}{V_{N(RS)} T_f}$   
 ただし、 $NF$  : ノイズ・フィギュア [dB]
- $R_S$  の熱雑音  
 $V_{N(RS)} = \sqrt{4kTR_S}$
- $R_S // R_{in}$  の熱雑音  
 $V_{N(RSRin)} = \sqrt{4kT \frac{R_S R_{in}}{R_S + R_{in}}}$
- 信号源に対する入力伝達関数  
 $T_f = \frac{R_{in}}{R_S + R_{in}} \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f C_{in} \frac{R_S R_{in}}{R_S + R_{in}})^2}}$
- 増幅器から見た入力部インピーダンス ( $R_{Zin}$ ) の実数部  
 $R_e(R_{Zin}) = \frac{\frac{R_S R_{in}}{R_S + R_{in}}}{1 + (2\pi f C_{in} \frac{R_S R_{in}}{R_S + R_{in}})^2}$

図 16-1 ノイズ・フィギュアの求めかた

### ● ノイズ・フィギュアとは入力の S/N と出力の S/N の比

例えば、インピーダンスが  $1 \text{ k}\Omega$  で、 $1 \text{ kHz}$ 、 $1 \text{ mV}$  を出力する信号源に、 $1 \text{ k}\Omega$ 、 $1 \text{ kHz}$  でのノイズ・フィギュアが  $6 \text{ dB}$ 、ゲイン  $100$  倍が得られる増幅器を接続すると、S/N は  $6 \text{ dB}$  ( $2$  倍) 悪くなります。したがって入力では、

$$1 \text{ mV}_{\text{RMS}} : 4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

という S/N が、出力では

$$100 \text{ mV}_{\text{RMS}} : 800 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

となります。

逆に言えば、ノイズ・フィギュア  $6 \text{ dB}$  の増幅器を使用しているとき、どんなに理想的な超低雑音増幅器