

フォトダイオード用トランスインピーダンス・アンプの 周波数特性をブロック線図で考える

【第4回】ブロック線図でTIAの周波数特性を考える

数式説明資料

フォトダイオードの電流を I_D 、接合容量を C_J 、OPアンプ単体の増幅率つまりオープンループゲインを $A(s)$ (s はラプラス変換のラプラス演算子で、 $s = j2\pi f$ として、さらには $s = 2\pi f$ として、もっと簡単には周波数のことだと考えてください)、出力を V_{OUT} とします。

ここまでの計算から、

$$\frac{V_{OUT}}{I} = - \frac{R_F X_{CJ}}{R_F + X_{CJ}} \left[\frac{A(s)}{1 + A(s)\beta} \right]$$

が得られます。なお帰還率 β は

$$\beta = \frac{X_{CJ}}{R_F + X_{CJ}}$$

【書画カメラ説明1回目（一番基本的なトランスインピーダンスの式）】

$A(s)$ が周波数 f （つまり s ）によらず、十分に大きい $A(s) = \infty$ という条件を考えてみます。最初に上記の式の[]中のみを計算してみます。

$$\left. \frac{A(s)}{1 + A(s)\beta} \right|_{A(s)=\infty} = \frac{\frac{A(s)}{A(s)}}{\frac{1}{A(s)} + \frac{A(s)\beta}{A(s)}} \bigg|_{A(s)=\infty} = \frac{1}{0 + \frac{\beta}{1}} = \frac{1}{\beta}$$

このように帰還率の逆数としてこの部分が計算できます。これはOPアンプでも同様な考え方です。いちばん上の式にこの答えを代入してみると、

$$\frac{V_{OUT}}{I} = - \frac{R_F X_{CJ}}{R_F + X_{CJ}} \cdot \frac{1}{\beta}$$

が得られます。ここに帰還率 β

$$\beta = \frac{X_{CJ}}{R_F + X_{CJ}}$$

を代入してみると、

$$\frac{V_{OUT}}{I} = -\frac{R_F X_{CJ}}{R_F + X_{CJ}} \cdot \frac{1}{\beta} = -\frac{R_F X_{CJ}}{R_F + X_{CJ}} \cdot \frac{R_F + X_{CJ}}{X_{CJ}} = -R_F$$

となり、一番基本的なトランスインピーダンスの式が

$$\frac{V_{OUT}}{I} = -R_F$$

として得られます。

【書画カメラ説明2回目（TIAのノイズゲイン。OPアンプの周波数特性は考慮しない）】

OPアンプの周波数特性は「ノイズゲイン」というもので決まります。ノイズゲインはOPアンプ回路を非反転増幅としてみたときの周波数特性に等しいものです。

ここではTIAのノイズゲインを考えます。ここでもまだ $A(s)$ が周波数によらず十分に大きい $A(s) = \infty$ という条件を考えます。つまり理想条件でノイズゲインを考えてみるものです。

非反転増幅回路のブロック線図は「第1回 準備その1」で示しましたが、その伝達関数がノイズゲイン G_{NG} に相当し

$$\frac{V_{OUT}}{V_I} = G_{NG} = \frac{A(s)}{1 + A(s)\beta}$$

$A(s) = \infty$ という条件では上記と同様に

$$G_{NG} = \frac{A(s)}{1 + A(s)\beta} \bigg|_{A(s)=\infty} = \frac{1}{\beta}$$

となります。

$$G_{NG} = \frac{1}{\beta} = \frac{R_F + X_{CJ}}{X_{CJ}}$$

ここで

$$X_{CJ} = \frac{1}{j2\pi f C_J}$$

ですから

$$G_{NG} = \frac{R_F + \frac{1}{j2\pi f C_J}}{\frac{1}{j2\pi f C_J}} = j2\pi f C_J R_F + 1$$

これが+3dBとなる周波数は、実数部と虚数部が等しくなるところで

$$|j2\pi f C_J R_F| = 1$$

これから

$$f = \frac{1}{2\pi C_J R_F}$$

になります。この周波数を境にして、ノイズゲインは周波数に比例して上昇を続けていきます。

しかし実際は以降のスライドのように、OPアンプのオープンループゲインの周波数特性に制限を受け、TIAの周波数特性としてもそこで特性低下が生じ始める（遮断周波数になる）ことになります。