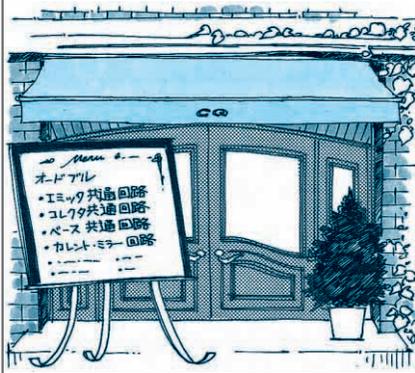


トランジスタCooking!



〈第12回〉

トランスリニア回路の動作

柴田 肇
Hajime Shibata

多くの電子回路では、バイポーラ・トランジスタを単に増幅素子として使いますが、そのような回路は、バイポーラ・トランジスタのもつ能力の一部を使っているにすぎません。

今回紹介するトランスリニア^{translinear}回路は、バイポーラ・トランジスタの精度の高い指数特性を利用した巧みな回路です。

トランスリニア原理を使うと、2乗回路、平方根回路、乗算回路、除算回路、実効値回路、絶対値回路、三角関数回路、ガウス分布回路などの、多くの非線形回路を実現できます。ギルバート乗算器も、実はトランスリニア回路で、トランスリニア原理を使って動作を考えることもできます。

トランスリニアという言葉は「トランスコンダクタンス ($g_m = dI_C/dV_{BE}$) が電流に対して線形に変化する (transconductance linear with current)」という意味を込めて作られた造語⁽¹⁾で、乗算回路で有名なバリー・ギルバート氏によるものです。

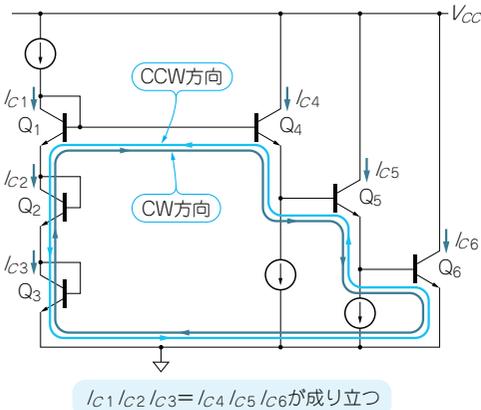


図12-1 トランスリニア原理とは

回路を構成する各トランジスタのベース端子とエミッタ端子をたどっていった結果、ループが形成されているとき、ベース電流が時計回り方向(CW)に流れるトランジスタのコレクタ電流の積は、ベース電流が反時計方向(CCW)に流れるトランジスタのコレクタ電流の積に等しくなる

トランスリニア原理とは

● 定義

図12-1に示すように、回路を構成する各トランジスタのベース端子とエミッタ端子をたどっていった結果、ループが形成されているとき、ベース電流が時計回り方向(CW)に流れるトランジスタのコレクタ電流の積と、ベース電流が反時計方向(CCW)に流れるトランジスタのコレクタ電流の積が等しくなります。

これをトランスリニア原理⁽¹⁾といいます。式で書くと、

$$\prod_{CW} I_{C_i} = \prod_{CCW} I_{C_j} \dots\dots\dots(12-1)$$

となります。CWとCCWのトランジスタの数が等しくない場合は、トランスリニア原理は成り立ちません。

● 任意の関数をバイポーラ・トランジスタ回路で表現できる!

式(12-1)が意味しているのは、バイポーラ・トランジスタを使った回路で、 $x^2 + 2x + 1$ などの任意の多項式や、 $(x-1)/(x^2+x+1)$ などの有理式を構成できるということです。

テイラー展開やマクローリン展開といった方法を使うと、任意の関数を多項式によって近似できますから、トランスリニア原理を応用すれば、任意の入出力関係をもつ回路を構成できるわけです。

● トランスリニア原理を導く

図12-1の回路を例にトランスリニア原理を導いてみましょう。

トランスリニア原理は、バイポーラ・トランジスタのベースとエミッタを経由して形成されるループについての関係則です。

図12-1の回路では、ベースとエミッタを通るループ(トランスリニア・ループという)が形成されています。このループに対してキルヒホッフの電圧則を適用

すると、

$V_{BE1} + V_{BE2} + V_{BE3} = V_{BE4} + V_{BE5} + V_{BE6} \dots (12-2)$
となります。ここで、次に示すバイポーラ・トランジスタの基本式、

$$I_C \doteq I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \dots (12-3)$$

を V_{BE} について解くと、

$$V_{BE} \doteq V_T \ln \frac{I_C}{I_S} \dots (12-4)$$

が得られます。これを式(12-2)に代入して整理すると次のようになります。

$$\ln \frac{I_{C1}}{I_S} + \ln \frac{I_{C2}}{I_S} + \ln \frac{I_{C3}}{I_S} = \ln \frac{I_{C4}}{I_S} + \ln \frac{I_{C5}}{I_S} + \ln \frac{I_{C6}}{I_S} \dots (12-5)$$

指数の加算は乗算になるので、

$$\frac{I_{C1}}{I_S} \frac{I_{C2}}{I_S} \frac{I_{C3}}{I_S} = \frac{I_{C4}}{I_S} \frac{I_{C5}}{I_S} \frac{I_{C6}}{I_S} \dots (12-6)$$

となります。整理すると、

$$I_{C1} I_{C2} I_{C3} = I_{C4} I_{C5} I_{C6} \dots (12-7)$$

つまり、

$$\prod_{j=1}^3 I_{Cj} = \prod_{j=4}^6 I_{Cj} \dots (12-8)$$

が得られます。

ここで、 Q_1 から Q_3 は、反時計回り(CCW)にベース-エミッタ間の矢印が向いていて、 Q_4 から Q_6 では時計回り(CW)になっています。このことから、式(12-8)の左辺はCCWの電流、右辺はCWの電流についての記述であることに気づきます。

式(12-8)を一般形に拡張すると、任意の数のトランジスタを含むトランスリニア・ループに対して、式(12-1)が成り立つこととなります。

● トランスリニア回路は温度が変化しても安定動作

ダイオードを使った折れ線近似などで、非線形関数を近似する場合には、温度変化などによって入出力特性が変化してしまいます。

これに対してトランスリニア回路では、式(12-5)から式(12-7)の変形の過程で、**デバイスに依存するパラメータ(I_S)が消去されていますから、すべてのトランジスタが同じ温度で変化する限り、温度に対してとても安定で入出力特性は変化しません。**

いろいろな関数をトランジスタで表現できる!

例題を通してトランスリニア原理のすごさをもっと体感しましょう。

● 1乗回路

一番簡単なトランスリニア回路は、図12-2に示す

よく見慣れたカレント・ミラー回路です。このカレント・ミラー回路にトランスリニア原理を適用して解析してみましょう。

図12-2に示す回路のベースとエミッタだけを通るトランスリニア・ループを探してください。すると青線で示したループが見つかります。時計回りのベース-エミッタ間の矢印をもつトランジスタは Q_2 、反時計回りの矢印をもつトランジスタは Q_1 です。

この回路に式(12-1)を適用すると、

$$I_{C2} = I_{C1} \dots (12-9)$$

が得られます。この結果は、カレント・ミラー回路の動作から想像するものと同じです。

ここで、ベース電流はコレクタ電流よりも十分小さく、無視できるとすると、

$$I_{C1} \doteq I_X \dots (12-10)$$

となります。出力電流 I_Y は Q_2 のコレクタから取り出すので、

$$I_{C2} = I_Y \dots (12-11)$$

となります。これらの式(12-10)と式(12-11)を式(12-9)に適用すると、

$$I_Y = I_X \dots (12-12)$$

が得られます。したがって、 I_X を入力、 I_Y を出力とする1乗(比例)回路といえます。

● 2乗回路

次に図12-3の回路を解析してみましょう。

この回路のトランスリニア・ループは、青線で示すループになります。このループに式(12-1)を適用します。時計回りの矢印をもつトランジスタは Q_3 と Q_4 、反時計回りの矢印をもつトランジスタは Q_1 と Q_2 です。したがって、

$$I_{C3} I_{C4} = I_{C1} I_{C2} \dots (12-13)$$

となります。ここでも、ベース電流がコレクタ電流に比較して無視できるほど小さいと仮定すると、

$$I_{C1} \doteq I_{C2} \doteq I_X \dots (12-14)$$

$$I_{C3} \doteq I_0 \dots (12-15)$$

となります。また次式が得られます。

$$I_{C4} = I_Y \dots (12-16)$$

これらを式(12-13)に代入して、 I_Y について整理すると、

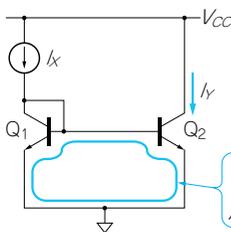


図12-2
1乗回路
 $I_X = I_Y$ が成り立つ

