

Baxandall tone control 回路をエクセルでシミュレーション

低音用にコンデンサを二個、高音用にコンデンサを一個使用する回路（案1）

Two-LF-capacitor one-HF-capacitor version alt-1

1)回路図

図-1 は低音用(Bass)に二つ、高音用(Treble)に一つのコンデンサを用いた方式の Baxandall トーンコントロール回路（案1）です。

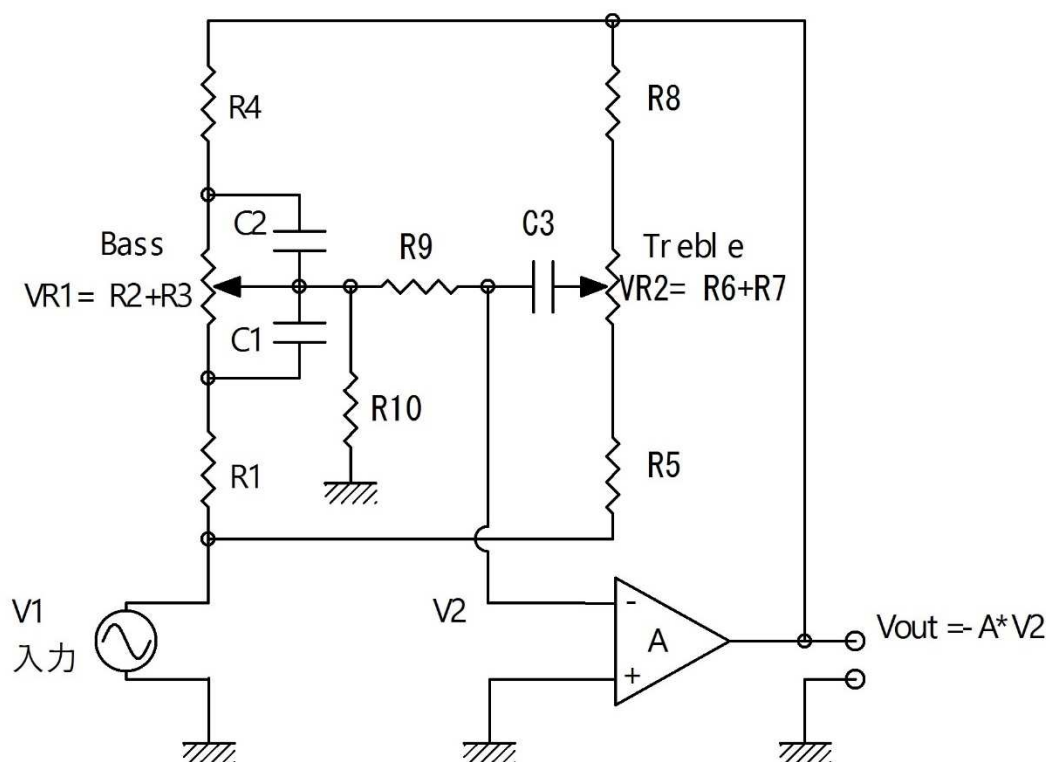


図-1

2)回路図を変形しインピーダンスのブロックに分ける

計算のために図-1 の CR 回路の部分を Z1 から Z7 に大きくまとめたのが図-2 です。

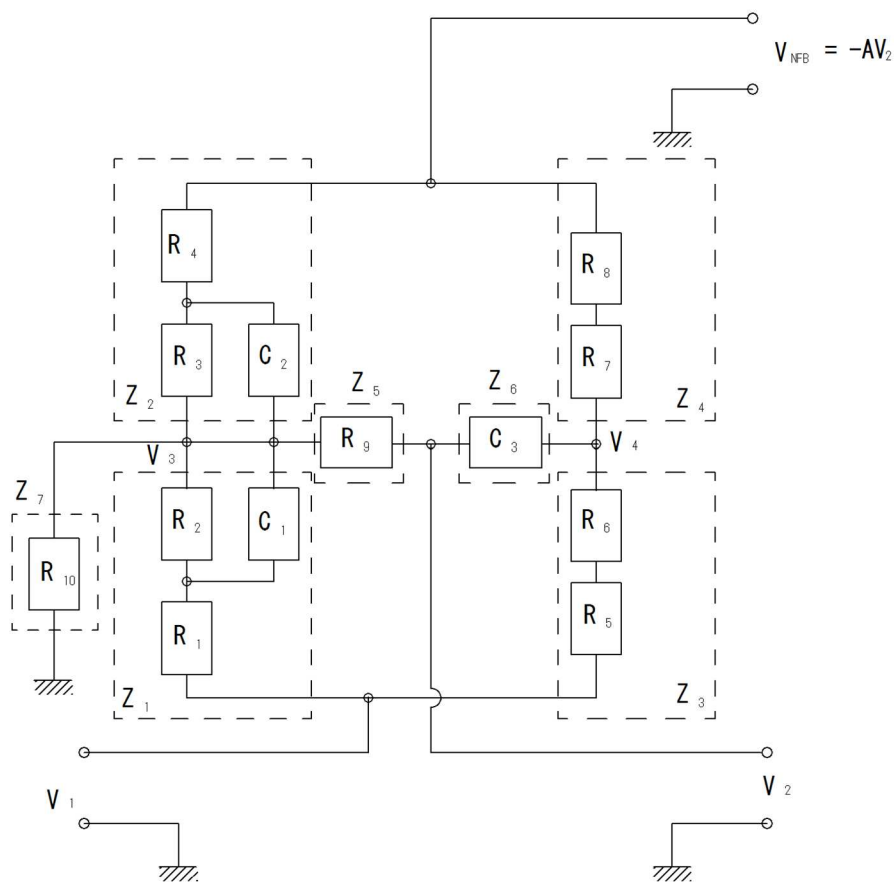


図-2

Z1 から Z7 は以下の通り計算できます。

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_1} \quad Z_2 = R_4 + \frac{1}{\frac{1}{R_3} + j\omega C_2}$$

$$Z_3 = R_5 + R_6 \quad Z_4 = R_7 + R_8$$

$$Z_5 = R_9 \quad Z_6 = \frac{1}{j\omega C_3} \quad Z_7 = R_{10}$$

以下の計算では、インピーダンス Z の代わりにその逆数であるアドミッタンス Y を用いた方が計算式が簡単に見えるので、次の通り Y₁ から Y₇ を定めます。

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1} \quad Y_2 = \frac{1}{Z_2} \quad Y_3 = \frac{1}{Z_3} \quad Y_4 = \frac{1}{Z_4} \quad Y_5 = \frac{1}{Z_5} \quad Y_6 = \frac{1}{Z_6} \quad Y_7 = \frac{1}{Z_7}$$

3) トーンコントロール回路のゲイン G を求めるために V_1 と V_{out} の関係を式に表す。

図-1 に示す Baxandall 型トーンコントロール回路は、アドミタンス Y_1 から Y_7 を用いて図-3 のように書くことができます。

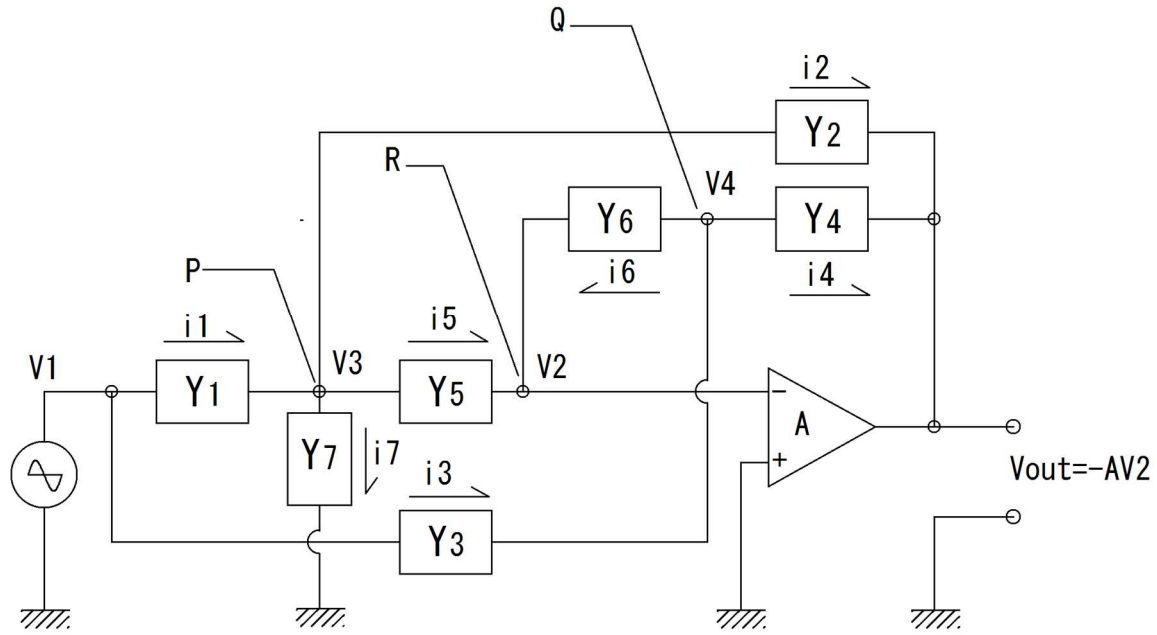


図-3

ここで、以下の式が成り立ちます。

$$i_1 = Y_1(V_1 - V_3) \quad \dots \textcircled{1}$$

$$i_2 = Y_2(V_3 - (-AV_2)) = Y_2(V_3 + AV_2) \quad \dots \textcircled{2}$$

$$i_3 = Y_3(V_1 - V_4) \quad \dots \textcircled{3}$$

$$i_4 = Y_4(V_4 - (-AV_2)) = Y_4(V_4 + AV_2) \quad \dots \textcircled{4}$$

$$i_5 = Y_5(V_3 - V_2) \quad \dots \textcircled{5}$$

$$i_6 = Y_6(V_4 - V_2) \quad \dots \textcircled{6}$$

$$i_7 = Y_7 V_3 \quad \dots \textcircled{7}$$

節点 P について、キルヒホッフの電流則（任意の接点に流入する枝電流の和は 0 である。）を適用すると、⑧の式が得られます。

$$i_1 - i_2 - i_5 - i_7 = 0 \quad \dots \textcircled{8}$$

同様に節点 Q について、キルヒホッフの電流則を適用すると、⑨の式が得られます。

$$i_3 - i_4 - i_6 = 0 \quad \dots \textcircled{9}$$

同様に節点 R について、キルヒホッフの電流則を適用すると、⑩の式が得られます。

$$i_5 + i_6 = 0 \quad \dots \textcircled{10}$$

未知数が i_1 から i_7 及び V_2, V_3, V_4 の 10 個であり、独立した（と思われる）式が 10 あるので、解が得られるはずです。少々めんどくさいですが、以下順番に解いていきます。

⑧に①②⑤⑦を代入する

$$Y_1(V_1 - V_3) - Y_2(V_3 + AV_2) - Y_5(V_3 - V_2) - Y_7V_3 = 0 \quad \dots \textcircled{11}$$

⑨に③④⑥を代入する

$$Y_3(V_1 - V_4) - Y_4(V_4 + AV_2) - Y_6(V_4 - V_2) = 0 \quad \dots \textcircled{12}$$

⑩に⑤⑥を代入する

$$Y_5(V_3 - V_2) + Y_6(V_4 - V_2) = 0 \quad \dots \textcircled{13}$$

⑬を変形

$$Y_5V_3 - Y_5V_2 + Y_6V_4 - Y_6V_2 = 0$$

$$Y_6V_4 = Y_6V_2 + Y_5V_2 - Y_5V_3$$

$$V_4 = \frac{Y_6V_2 + Y_5V_2 - Y_5V_3}{Y_6}$$

$$V_4 = \frac{(Y_5 + Y_6)V_2 - Y_5V_3}{Y_6} \quad \dots \textcircled{14}$$

⑪を変形

$$Y_1(V_1 - V_3) - Y_2(V_3 + AV_2) - Y_5(V_3 - V_2) - Y_7V_3 = 0$$

$$Y_1V_1 - Y_1V_3 - Y_2V_3 - AY_2V_2 - Y_5V_3 + Y_5V_2 - Y_7V_3 = 0$$

$$Y_1V_1 - Y_1V_3 - Y_2V_3 - Y_5V_3 - Y_7V_3 - AY_2V_2 + Y_5V_2 = 0$$

$$Y_1V_1 + (-AY_2 + Y_5)V_2 - (Y_1 + Y_2 + Y_5 + Y_7)V_3 = 0$$

$$V_3 = \frac{Y_1V_1 + (-AY_2 + Y_5)V_2}{Y_1 + Y_2 + Y_5 + Y_7} \quad \dots \quad \textcircled{15}$$

⑫を変形

$$Y_3(V_1 - V_4) - Y_4(V_4 + AV_2) - Y_6(V_4 - V_2) = 0$$

$$Y_3V_1 - Y_3V_4 - Y_4V_4 - AY_4V_2 - Y_6V_4 + Y_6V_2 = 0$$

$$Y_3V_1 - AY_4V_2 + Y_6V_2 - Y_3V_4 - Y_4V_4 - Y_6V_4 = 0$$

$$Y_3V_1 + (-AY_4 + Y_6)V_2 - (Y_3 + Y_4 + Y_6)V_4 = 0$$

$$V_4 = \frac{Y_3V_1 + (-AY_4 + Y_6)V_2}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \quad \dots \quad \textcircled{16}$$

⑬に⑭を代入して V_4 を消去

$$\frac{(Y_5 + Y_6)V_2 - Y_5V_3}{Y_6} = \frac{Y_3V_1 + (-AY_4 + Y_6)V_2}{Y_3 + Y_4 + Y_6}$$

$$\frac{Y_5 + Y_6}{Y_6}V_2 - \frac{Y_5}{Y_6}V_3 = \frac{Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6}V_1 + \frac{-AY_4 + Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6}V_2$$

$$\frac{Y_5}{Y_6}V_3 = \frac{-Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6}V_1 + \frac{Y_5 + Y_6}{Y_6}V_2 - \frac{-AY_4 + Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6}V_2$$

$$V_3 = \frac{Y_6}{Y_5} \left\{ \frac{-Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6}V_1 + \left(\frac{Y_5 + Y_6}{Y_6} + \frac{AY_4 - Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_2 \right\} \quad \dots \quad \textcircled{17}$$

⑮に⑯を代入して V_3 を消去

$$\frac{Y_1V_1 + (-AY_2 + Y_5)V_2}{Y_1 + Y_2 + Y_5 + Y_7} = \frac{Y_6}{Y_5} \left\{ \frac{-Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6}V_1 + \left(\frac{Y_5 + Y_6}{Y_6} + \frac{AY_4 - Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_2 \right\}$$

$$\frac{Y_1V_1 + (-AY_2 + Y_5)V_2}{Y_1 + Y_2 + Y_5 + Y_7} + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6}V_1 - \frac{Y_6}{Y_5} \left(\frac{Y_5 + Y_6}{Y_6} + \frac{AY_4 - Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_2 = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_5 + Y_7}V_1 + \frac{-AY_2 + Y_5}{Y_1 + Y_2 + Y_5 + Y_7}V_2 + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6}V_1 \\ - \frac{Y_6}{Y_5} \left(\frac{Y_5 + Y_6}{Y_6} + \frac{AY_4 - Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_2 = 0 \end{aligned}$$

$$\left(\frac{Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_5 + Y_7} + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_1 + \left(\frac{-AY_2 + Y_5}{Y_1 + Y_2 + Y_5 + Y_7} - \frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_5 + Y_6}{Y_6} - \frac{Y_6}{Y_5} \frac{AY_4 - Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_2 = 0$$

$$\left(\frac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_5+Y_7}+\frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_1+\left(\frac{-AY_2+Y_5}{Y_1+Y_2+Y_5+Y_7}-\frac{Y_5+Y_6}{Y_5}-\frac{Y_6}{Y_5} \frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_2=0$$

$$\left(\frac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_5+Y_7}+\frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_1=\left(\frac{AY_2-Y_5}{Y_1+Y_2+Y_5+Y_7}+1+\frac{Y_6}{Y_5}+\frac{Y_6}{Y_5} \frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}\right)V_2$$

$$V_2=\frac{\frac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_5+Y_7}+\frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}}{1+\frac{Y_6}{Y_5}+\frac{AY_2-Y_5}{Y_1+Y_2+Y_5+Y_7}+\frac{Y_6}{Y_5} \frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}}V_1$$

出力電圧は $-AV_2$ ですので、 V_{out} は以下の式で得られます。

$$V_{out}=-A\frac{\frac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_5+Y_7}+\frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}}{1+\frac{Y_6}{Y_5}+\frac{AY_2-Y_5}{Y_1+Y_2+Y_5+Y_7}+\frac{Y_6}{Y_5} \frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}}V_1$$

従ってゲイン G は以下の式で得られます。

$$G=\left|\frac{V_{out}}{V_1}\right|=\left|-A\frac{\frac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_5+Y_7}+\frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3+Y_4+Y_6}}{1+\frac{Y_6}{Y_5}+\frac{AY_2-Y_5}{Y_1+Y_2+Y_5+Y_7}+\frac{Y_6}{Y_5} \frac{AY_4-Y_6}{Y_3+Y_4+Y_6}}\right|$$

4)入力インピーダンスを求める

入力インピーダンス Z_{in} は

$$Z_{in}=\frac{V_1}{i_1+i_3} \quad \text{で求められます。}$$

式①より

$$i_1=Y_1(V_1-V_3)$$

式③より

$$i_3=Y_3(V_1-V_4)$$

V_{out} 計算する過程で V_3 , V_4 は、すでに得られているので、これらを代入することによりエクセルを用いて容易に Z_{in} を算出することができます。

5)出力側の負荷になるインピーダンス Z_L を求める

出力側に接続されたトーンコントロール回路を出力側から見た場合のインピーダンス Z_L は、以下の式で計算できます。

$$Z_L = \frac{V_{out}}{i_2 + i_4}$$

式②より

$$i_2 = Y_2(V_3 + AV_2)$$

式④より

$$i_4 = Y_4(V_4 + AV_2)$$

Z_{in} と同様に、 V_{out} 計算する過程で V_2 , V_3 , V_4 はすでに得られているので、これらを代入することによりエクセルを用いて容易に Z_L を算出することができます。

6)まとめ

以上のように入力信号の周波数、抵抗とコンデンサの値、増幅回路のオープンゲインを設定すれば計算結果として Baxandall トーンコントロール回路の出力電圧、入力インピーダンス Z_{in} 、増幅器の出力側からトーンコントロール回路を負荷として見た場合のインピーダンス Z_L を得ることができます。周波数ごとに値を得ることができるので、エクセルで1行ごとに周波数を変化させて計算すれば、周波数の変化による各種の値の変化を見ることができます。なお、上記の計算式は複素数を扱っているため、エクセルで計算する場合は、複素数の加減乗除の関数を使用する必要があります。

元のページ

<https://www.itoharu-tube.com/car-bax/car-bax4.html>