

Baxandall tone control 回路をエクセルでシミュレーションする (2Cバージョン)

1) 回路図

図-1 は低音用(Bass)、高音用(Treble)にそれぞれ二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です。

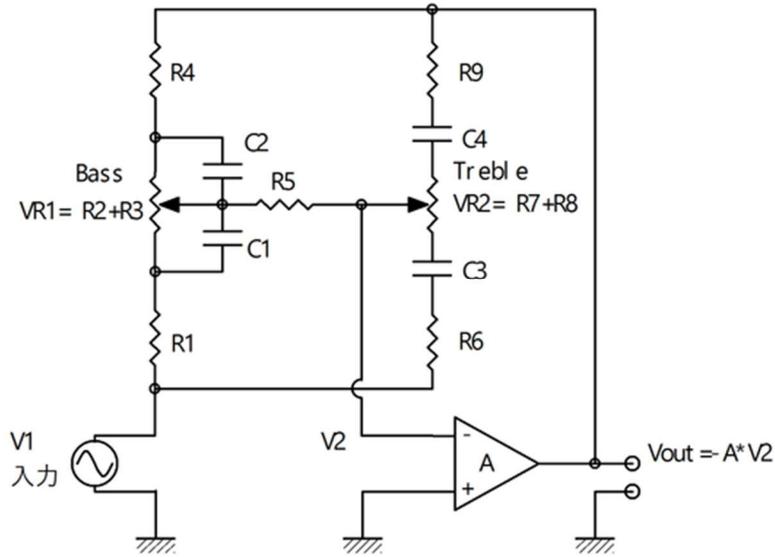


図-1

2) 回路図を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 Z4 に大きくまとめたのが図-2 です。

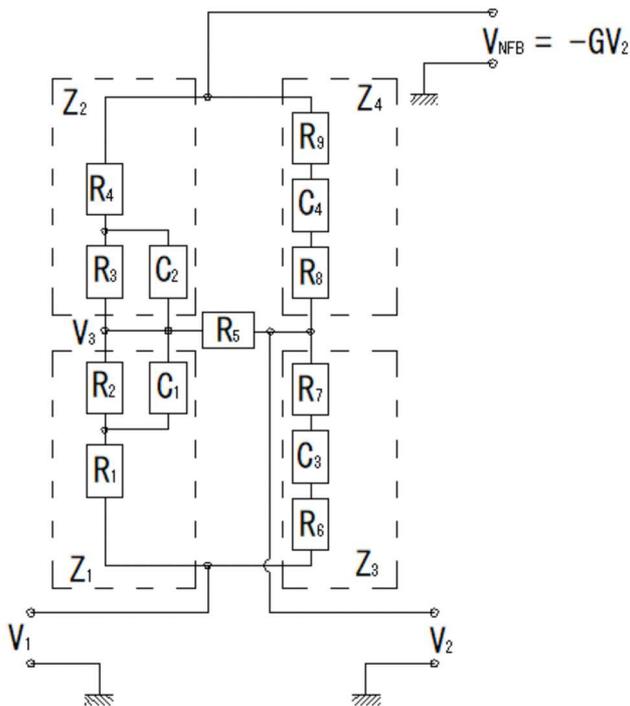


図-2

Z1 から Z4 は以下の通り計算できます。

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_1}$$

$$Z_2 = R_4 + \frac{1}{\frac{1}{R_3} + j\omega C_2}$$

$$Z_3 = R_6 + \frac{1}{j\omega C_3} + R_7$$

$$Z_4 = R_8 + \frac{1}{j\omega C_4} + R_9$$

以下の計算では、式が比較的簡単になるという理由からインピーダンス Z の代わりにインピーダンスの逆数であるアドミタンス Y を用いて計算します。

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1}, Y_2 = \frac{1}{Z_2}, Y_3 = \frac{1}{Z_3}, Y_4 = \frac{1}{Z_4}$$

また、R5 もアドミタンスとして表現するため、以下のよう計算します。

$$Y_6 = \frac{1}{R_5}$$

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

図-1 をアドミタンスの表記でしたのが図-3 です。各部の電流に着目しキルヒホッフの電流則を P, Q の各節点について適用することで、回路の方程式をたてます。

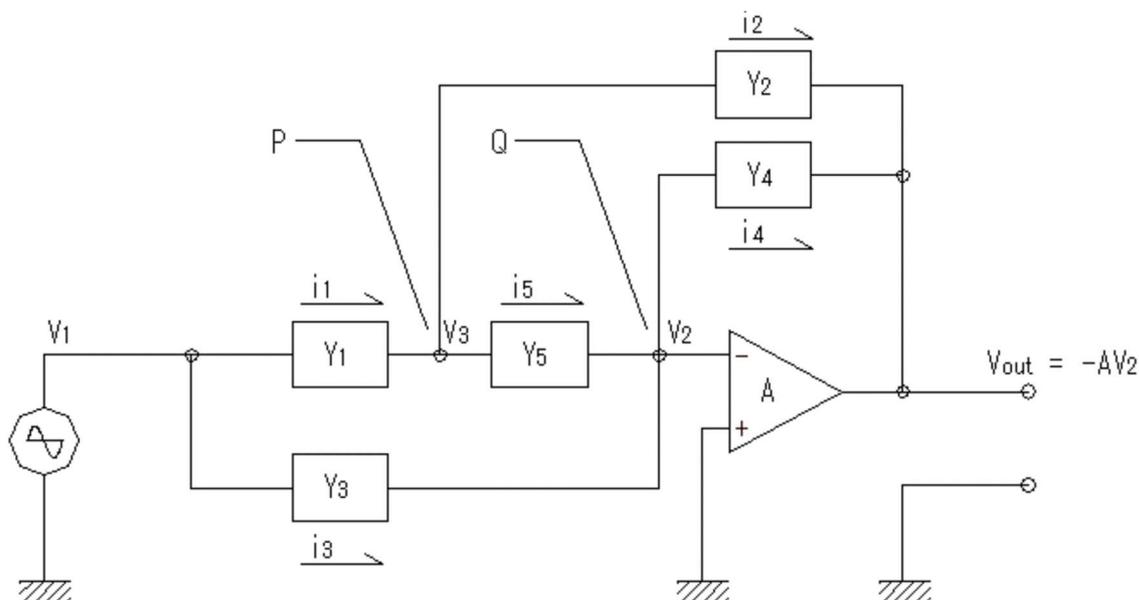


図-3

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

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

$$i_3 = Y_3(V_1 - V_2) \quad \dots \textcircled{3}$$

$$i_4 = Y_4(V_2 - (-AV_2)) = Y_4(V_2 + AV_2) \quad \dots \textcircled{4}$$

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

節点 P について、キルヒホッフの電流則を適用

$$i_1 - i_2 - i_5 = 0 \quad \dots \textcircled{6}$$

同様に節点 Q について、キルヒホッフの電流則を適用

$$i_3 - i_4 + i_5 = 0 \quad \dots \textcircled{7}$$

未知数が 7 個で式が七つあるので解が得られるはずですが。

⑥に①②⑤を代入する。

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

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

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

$$V_3 = \frac{Y_1V_1 - (AY_2 - Y_5)V_2}{Y_1 + Y_2 + Y_5} \quad \dots \textcircled{8}$$

⑦に③④⑤を代入する。

$$Y_3(V_1 - V_2) - Y_4(V_2 + AV_2) + Y_5(V_3 - V_2) = 0$$

$$Y_3(V_1 - V_2) - Y_4(1 + A)V_2 + Y_5(V_3 - V_2) = 0$$

$$Y_3V_1 - Y_3V_2 - Y_4(1 + A)V_2 - Y_5V_2 + Y_5V_3 = 0$$

$$Y_3V_1 - \{Y_3 + Y_4(1 + A) + Y_5\}V_2 + Y_5V_3 = 0$$

$$V_3 = -\frac{1}{Y_5} [Y_3V_1 - \{Y_3 + Y_4(1 + A) + Y_5\}V_2]$$

$$V_3 = -\frac{Y_3}{Y_5}V_1 + \frac{Y_3 + Y_4(1 + A) + Y_5}{Y_5}V_2 \quad \dots \textcircled{9}$$

⑧⑨より、

$$\frac{Y_1 V_1 - (AY_2 - Y_5)V_2}{Y_1 + Y_2 + Y_5} = -\frac{Y_3}{Y_5} V_1 + \frac{Y_3 + Y_4(1+A) + Y_5}{Y_5} V_2$$

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

$$V_2 = \frac{\frac{Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_3}{Y_5}}{\frac{AY_2 - Y_5}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_3 + Y_4(1+A) + Y_5}{Y_5}} V_1 \quad \dots \textcircled{10}$$

出力電圧は $-AV_2$ であるから、 V_{out} は以下の式で得られる。

$$V_{out} = -A \frac{\frac{Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_3}{Y_5}}{\frac{AY_2 - Y_5}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_3 + Y_4(1+A) + Y_5}{Y_5}} V_1 \quad \dots \textcircled{11}$$

従ってトーンコントロール回路のゲイン G は以下の式で得られます。

$$G = \left| \frac{V_{out}}{V_1} \right| = \left| -A \frac{\frac{Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_3}{Y_5}}{\frac{AY_2 - Y_5}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_3 + Y_4(1+A) + Y_5}{Y_5}} \right| \quad \dots \textcircled{12}$$

⑫式を見ると非常に複雑な計算が必要に見えますが、部分ごとに分割してエクセルのセルに関数を入力していくことで、計算ミスを防ぐことができます。なお、 Y_1 から Y_4 は複素数ですので、エクセルの関数は複素数の加減乗除の関数を用いる必要があります。

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} は次の式で求められます。

$$Z_{in} = \frac{V_1}{i_1 + i_3} \quad \dots \textcircled{13}$$

上記の値は複素数ですので絶対値をとると、

$$|Z_{in}| = \left| \frac{V_1}{i_1 + i_3} \right| \quad \dots \textcircled{14}$$

となります。

式①③より

$$i_1 = Y_1(V_1 - V_3) \quad i_3 = Y_3(V_1 - V_2)$$

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) トーンコントロール回路を負荷としてみた場合のインピーダンス Z_L を求める

図-4 に示す通りオペアンプの出力から見た場合、トーンコントロール回路の抵抗やコンデンサは負荷となります。オペアンプであればあまり問題にならないかもしれませんが、真空管回路での応用を考慮すると負荷としてのインピーダンスが低いと動作に問題が生じる恐れがあります。

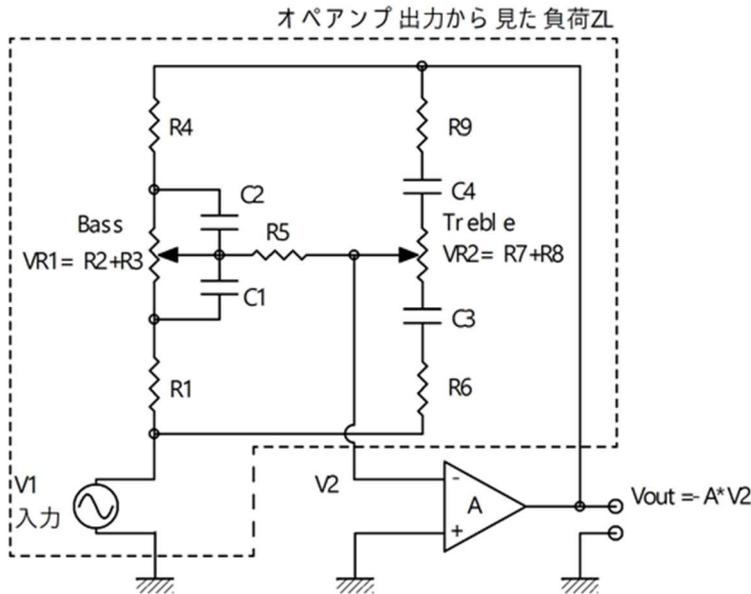


図-4

トーンコントロール回路の負荷としてのインピーダンスを Z_L とおくと、 Z_L は次の式で求められます。

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

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

②③より

$$i_2 = Y_2(V_3 + AV_2) \quad i_4 = Y_4(V_2 + AV_2)$$

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ので、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/bax/bax1.html>