

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

## 1)回路図

図-1 は低音用(Bass)、高音用(Treble)にそれぞれ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です。真空管回路での使用を想定するため、真空管のグリッド抵抗 R9 を追加してあります。

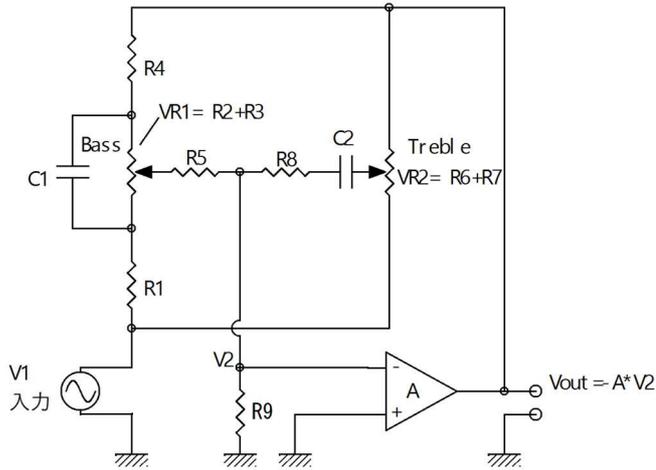


図-1

## 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 回路の部分抜き出して表現を変えたのが図-2 です。

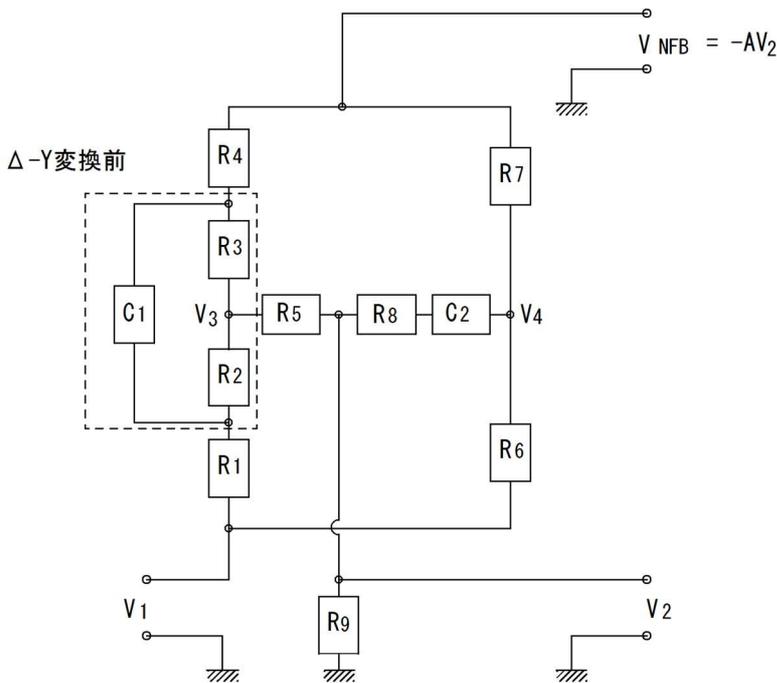


図-2

この回路図では、帰還回路のインピーダンスの計算が難しいため、図-2の破線で囲んだ部分に $\Delta$ -Y変換を適用して回路を変形します。(図-3) この変形の結果、図-4のように回路の要素を分割することができます。

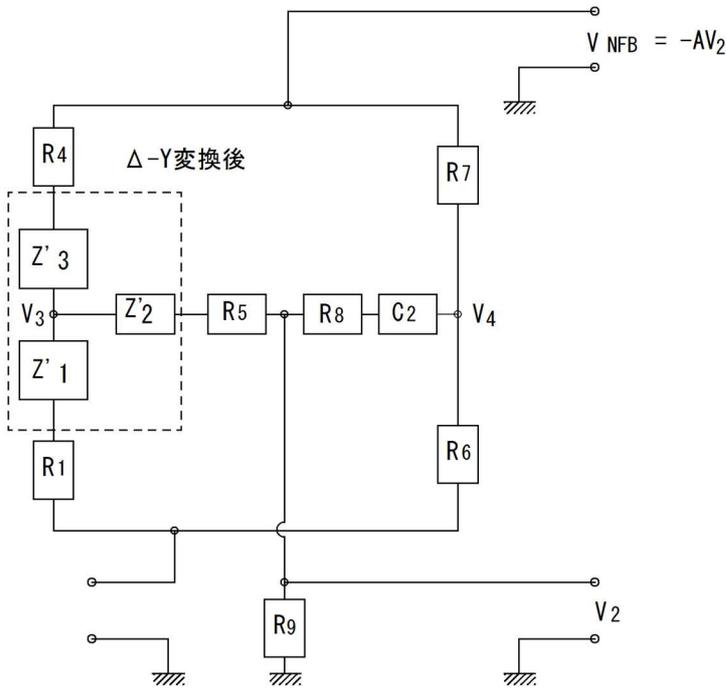


図-3

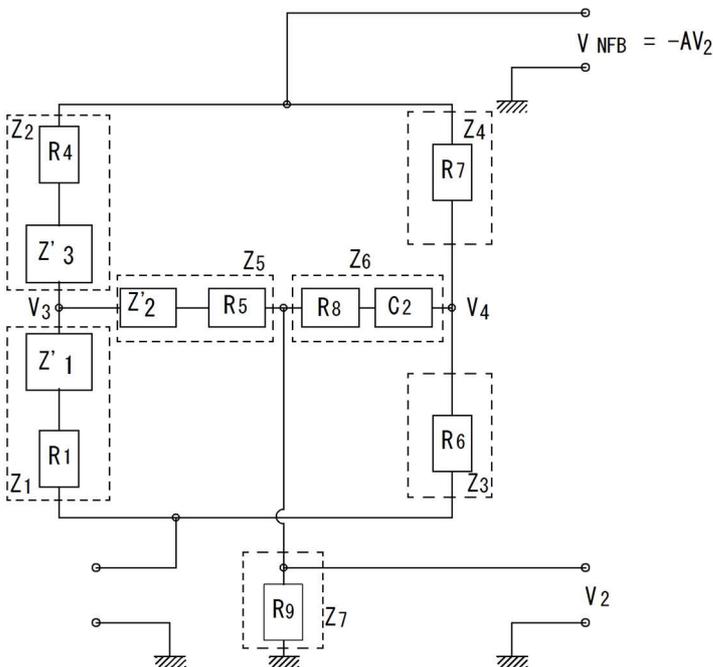


図-4

図-4の回路を大きくまとめて、 $Z_1$  から  $Z_7$  に分けて計算を行います。まず、 $z_1 z_2 z_3$  を算出します。

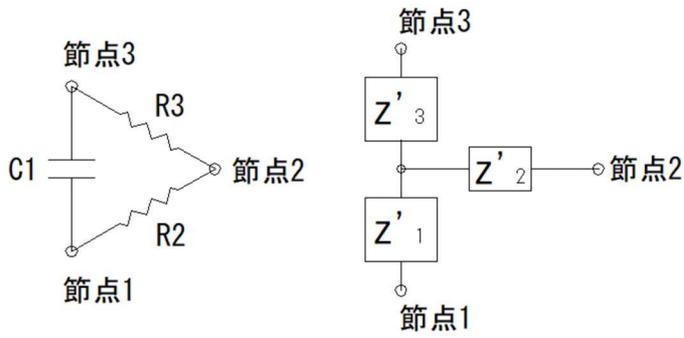


図-5

$\Delta$ -Y 変換の公式により

$$z'_1 = \frac{R_2 \frac{1}{j\omega C_1}}{R_2 + R_3 + \frac{1}{j\omega C_1}}$$

$$z'_2 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3 + \frac{1}{j\omega C_1}}$$

$$z'_3 = \frac{R_3 \frac{1}{j\omega C_1}}{R_2 + R_3 + \frac{1}{j\omega C_1}}$$

従って、

$$Z_1 = z'_1 + R_1, \quad Z_2 = z'_3 + R_4, \quad Z_3 = R_6, \quad Z_4 = R_7,$$

$$Z_5 = z'_2 + R_5, \quad Z_6 = \frac{1}{j\omega C_2} + R_8, \quad Z_7 = R_9$$

以下では計算を簡単にするために、 $Z$  (インピーダンス) の代わりにその逆数である  $Y$  (アドミタンス) を用います。(図-6)

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

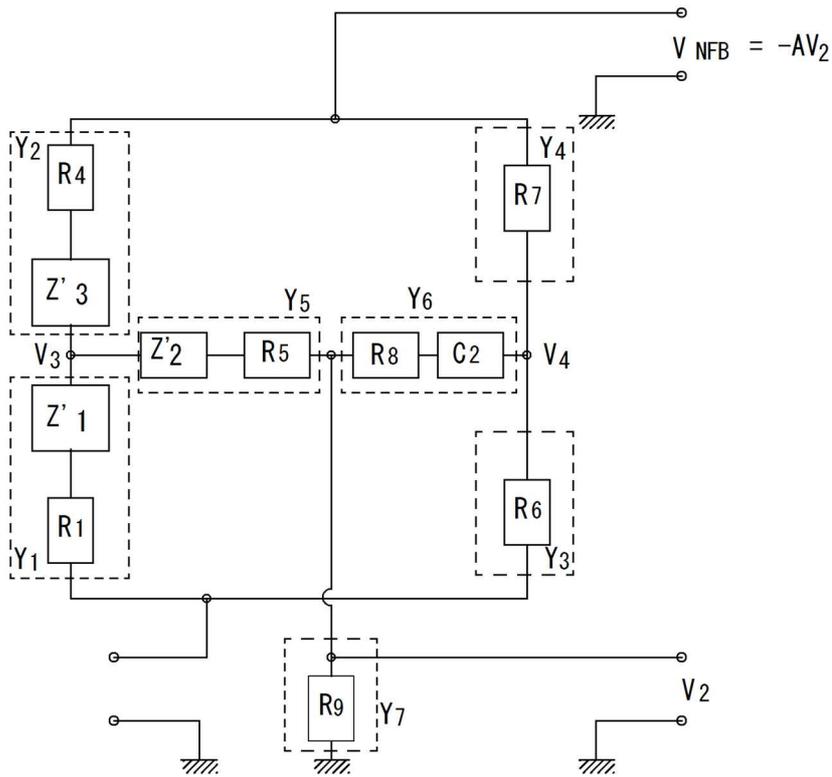


図-6

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したのが図-7 です。各部の電流に着目しキルヒホッフの電流則を P, Q, R の各節点について適用することで、回路の方程式を立てます。

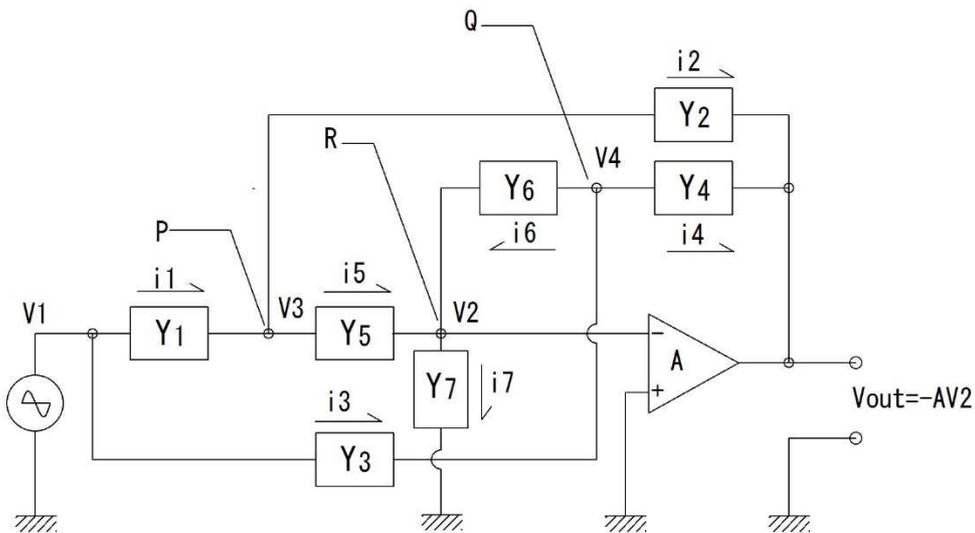


図-7

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

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

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

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

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

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

$$i_7 = Y_7V_2 \quad \dots \textcircled{7}$$

節点 P について、キルヒホッフの電流則を適用

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

同様に節点 Q について、キルヒホッフの電流則を適用

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

同様に節点 R について、キルヒホッフの電流則を適用

$$i_5 + i_6 - i_7 = 0 \quad \dots \textcircled{10}$$

未知数が  $i_1$  から  $i_7$  と  $V_2, V_3, V_4$  の合計 10 個ですので上記の十の式から解を得られるはずですが。

⑧に①②⑤を代入する

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

⑨に③④⑥を代入

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

⑩に⑤⑥⑦を代入

$$Y_5(V_3 - V_2) + Y_6(V_4 - V_2) - Y_7V_2 = 0 \quad \dots \textcircled{13}$$

⑬を変形

$$Y_5V_3 - Y_5V_2 + Y_6V_4 - Y_6V_2 - Y_7V_2 = 0$$

$$Y_6V_4 = Y_6V_2 + Y_5V_2 - Y_5V_3 + Y_7V_2$$

$$V_4 = \frac{Y_6V_2 + Y_5V_2 - Y_5V_3 + Y_7V_2}{Y_6}$$

$$V_4 = \frac{(Y_5 + Y_6 + Y_7)V_2 - Y_5V_3}{Y_6} \dots \textcircled{14}$$

⑪を変形

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

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

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

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

⑫を変形

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

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

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

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

⑬に⑭を代入して $V_4$ を消去

$$\frac{(Y_5 + Y_6 + Y_7)V_2 - Y_5V_3}{Y_6} = \frac{Y_3V_1 + (-AY_4 + Y_6)V_2}{Y_3 + Y_4 + Y_6}$$

$$\frac{Y_5 + Y_6 + Y_7}{Y_6}V_2 - \frac{Y_5}{Y_6}V_3 = \frac{Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6}V_1 + \frac{-AY_4 + Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6}V_2$$

$$\frac{Y_5}{Y_6}V_3 = \frac{-Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6}V_1 + \frac{Y_5 + Y_6 + Y_7}{Y_6}V_2 - \frac{-AY_4 + Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6}V_2$$

$$V_3 = \frac{Y_6}{Y_5} \left\{ \frac{-Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6}V_1 + \left( \frac{Y_5 + Y_6 + Y_7}{Y_6} - \frac{-AY_4 + Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_2 \right\} \dots \textcircled{17}$$

⑰に⑮を代入して $V_3$ を消去

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

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

$$\begin{aligned} & \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_5} V_1 + \frac{-AY_2 + Y_5}{Y_1 + Y_2 + Y_5} V_2 + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6} V_1 - \frac{Y_6}{Y_5} \left( \frac{Y_5 + Y_6 + Y_7}{Y_6} + \frac{AY_4 - Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_2 \\ & = 0 \\ & \left( \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_1 + \left( \frac{-AY_2 + Y_5}{Y_1 + Y_2 + Y_5} - \frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_5 + Y_6 + Y_7}{Y_6} + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{AY_4 - Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_2 = 0 \\ & \left( \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_1 + \left( \frac{-AY_2 + Y_5}{Y_1 + Y_2 + Y_5} - \frac{Y_5 + Y_6 + Y_7}{Y_5} - \frac{Y_6}{Y_5} \frac{AY_4 - Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_2 = 0 \\ & \left( \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_1 = \left( \frac{AY_2 - Y_5}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + 1 + \frac{Y_6 + Y_7}{Y_5} + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{AY_4 - Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6} \right) V_2 \\ & V_2 = \frac{\frac{Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6}}{1 + \frac{Y_6 + Y_7}{Y_5} + \frac{AY_2 - Y_5}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{AY_4 - Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6}} V_1 \quad \dots \textcircled{18} \end{aligned}$$

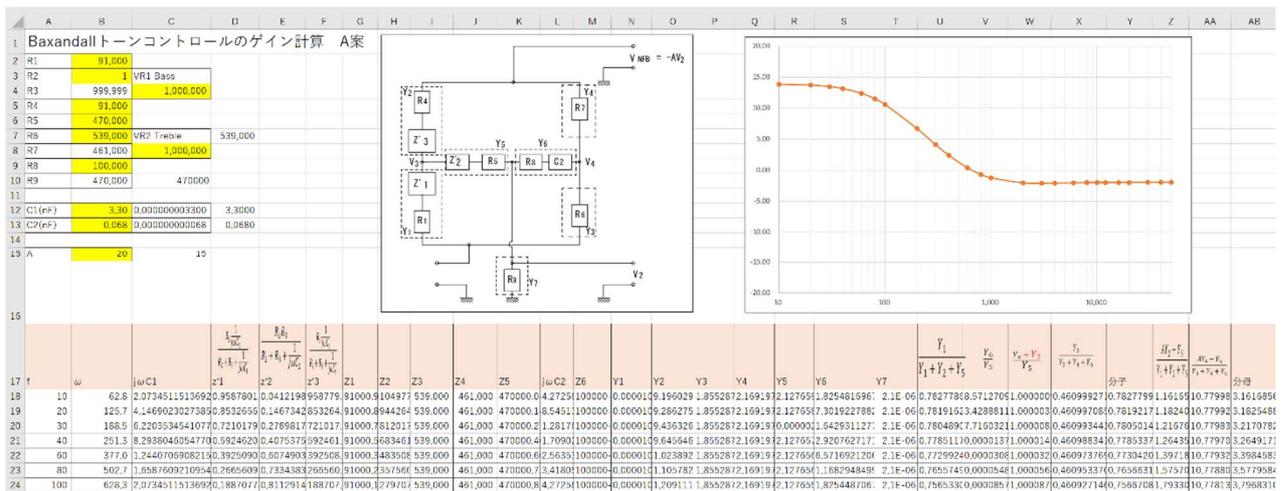
出力電圧は $-AV_2$ ですので、 $V_{out}$  は以下の式で得られます。

$$V_{out} = -A \frac{\frac{Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6}}{1 + \frac{Y_6 + Y_7}{Y_5} + \frac{AY_2 - Y_5}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{AY_4 - Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6}} V_1 \quad \dots \textcircled{19}$$

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。

$$|G| = \left| \frac{V_{out}}{V_1} \right| = \left| -A \frac{\frac{Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{Y_3}{Y_3 + Y_4 + Y_6}}{1 + \frac{Y_6 + Y_7}{Y_5} + \frac{AY_2 - Y_5}{Y_1 + Y_2 + Y_5} + \frac{Y_6}{Y_5} \frac{AY_4 - Y_6}{Y_3 + Y_4 + Y_6}} \right| \quad \dots \textcircled{20}$$

以上の計算をエクセルで行ってみたものが下記の画像です。



周波数ごとに値を得ることができるので、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、複素数の加減乗除の関数を使用する必要があります。  
関数の入力は手間ですが、式を分割して段階を追って作成すればミスも見つかりやすくなります。

#### 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、入力電圧を入力電流で割ればよいので、次の式で求められます。

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

① ③より

$$i_1 = Y_1(V_1 - V_3) \quad i_3 = Y_3(V_1 - V_4)$$

$V_{out}$ 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)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-8に示すように、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。そこで、これまでに得られた数値を用いてこの負荷の重さを計算してみます。

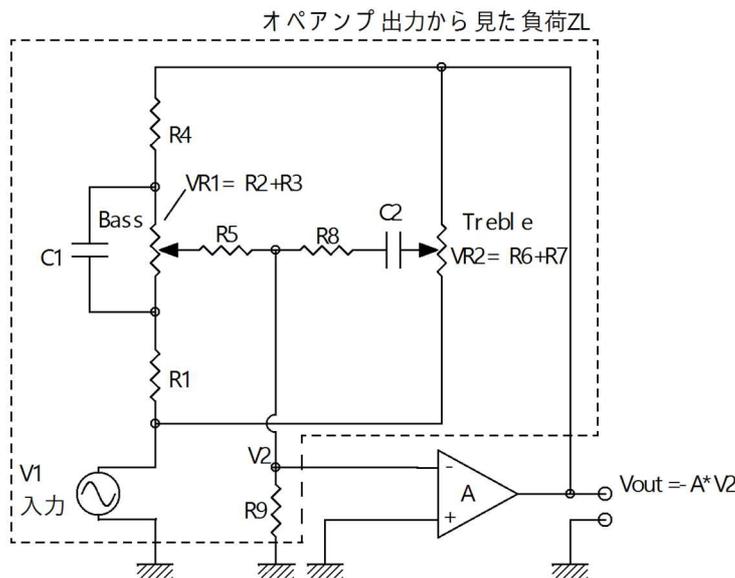


図-8

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 $Z_L$ とすると、 $Z_L$ は次の式で求められます。

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

② ④より

$$i_2 = Y_2(V_3 + AV_2) \quad i_4 = Y_4(V_4 + AV_2)$$

$Z_{in}$ 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。

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
1 Baxandall トーンコントロールのZin及びZL計算 A案																				
2																				
3	A 20																			
4	$i_1 = Y_1(V_1 - V_2) \quad Y_2(V_3 + AV_2) \quad i_3 = Y_3(V_1 - V_2) \quad Y_4(V_1 + AV_2)$ $I_1 + I_3 \quad Z_L \quad I_2 + I_4$																			
f	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	V2/V1	V3/V1	V4/V1	Vout	i1	i2	i3	i4	Zin	ZL	f	Zin	ZL	
6	10	0.00001099	1.960292	1.85528752	1.69197392	1.2765938	1.82548169	0.24572846	0.49200316	-2.1876640	-4.9145692	5.58232303	5.05833435	9.140334	5.9151956	86983.961	-447719.5	10	86.984	449.775
7	20	0.00001099	2.862751	1.85528752	1.69197392	1.2765891	7.30192278	0.23859012	0.47929028	-2.1098860	-4.7718022	5.00000574	5.2098999	0.0000057	5.7742222	87018.427	-43391.2	20	87.019	441.746
8	30	0.00001099	4.363260	1.85528752	1.69197392	0.00000212	1.64293112	0.22772124	0.45993336	-1.9914608	-4.5544248	5.93474505	5.4406771	5.5500201	5.5595748	87070.995	-413002.4	30	87.071	429.294
9	40	0.00001099	6.456469	1.85528752	1.69197392	1.2765772	2.92076271	0.21433894	0.43609984	-1.8456501	-4.2867788	6.19665642	5.7248252	5.2794992	0.0000052	87135.865	-387422.1	40	87.137	413.554
10	60	0.00001099	1.0238928	1.85528752	1.69197392	1.2765682	6.57169212	0.18473879	0.3833810	-1.5231339	-3.6947758	6.7759935	6.3533512	4.6811389	0.0000047	87279.888	-331497.0	60	87.281	376.860
11	80	0.00001099	1.1057821	1.85528752	1.69197392	1.2765625	1.16829484	0.15677936	0.3335809	-1.2184964	-3.1355873	7.32325536	6.94708264	1.1594894	1.5854858	87416.491	-279485.3	80	87.418	339.189
12	100	0.00001099	1.2091114	1.85528752	1.69197392	1.2765590	1.82544870	0.13336576	0.29187292	-0.9633913	-2.6673152	7.78159122	7.4443426	3.6426555	3.6961472	87531.107	-236524.9	100	87.532	304.580
13	200	0.00001099	1.9928990	1.85528752	1.69197392	1.2765529	7.30139497	0.07383383	0.18574817	-0.3147965	-1.4766767	8.94781286	8.7096977	2.4393257	2.5203475	87871.930	-129661.0	200	87.818	193.247
14	300	0.00001099	3.0529305	1.85528752	1.69197392	1.2765514	1.64266394	0.05532951	0.15261239	-0.1132724	-1.1065902	9.31194706	0.0000091	2.0654404	2.1547024	87893.639	-97112.40	300	87.894	143.031
15	400	0.00001099	1.1767205	1.85528752	1.69197392	1.2765511	12.91991840	0.04790385	0.13913554	-0.0324971	-0.9580770	0.00000940	0.0000092	1.9155791	2.0077655	87906.942	-84129.86	400	87.907	117.116
16	600	0.00001099	1.1389771	1.85528752	1.69197392	1.2765506	1.56741937	0.04228176	0.12842220	0.0283894	-0.8456356	9.57777579	9.3944984	1.8026169	1.8959329	87868.415	-74308.11	600	87.869	92.727
17	800	0.00001099	0.0000075	1.85528752	1.69197392	1.2765506	1.16694514	0.04029496	0.12395417	0.0495459	-0.8058993	9.62687649	9.4488785	0.0000017	1.8556296	87789.981	-70809.27	800	87.792	82.169
18	1,000	0.00001099	0.4652505	1.85528752	1.69197392	1.2765505	1.82215571	0.03941901	0.12127993	0.05850107	-0.7883802	0.00000965	9.4820921	1.7467512	1.8370528	87688.841	-69231.58	1,000	87.692	76.781
19	2,000	0.00001099	0.0000102	1.85528752	1.69197392	1.2765505	7.24899646	0.03868309	0.11319888	0.0629401	-0.7736619	9.74506709	9.5865231	1.7385155	1.8147550	87661.794	-67597.19	2,000	87.071	69.422
20	3,000	0.00001099	0.0000106	1.85528752	1.69197392	1.2765504	1.61637780	0.03895390	0.10758429	0.0567661	-0.7790781	9.80676590	9.6607441	1.7499701	1.8131112	86507.679	-67729.84	3,000	86.519	68.469
21	4,000	0.00001099	0.0000107	1.85528752	1.69197392	1.2765504	2.83788317	0.03923466	0.10374609	0.05141351	-0.7846932	9.84894439	9.7116864	1.7599007	1.8136806	866121.452	-67968.51	4,000	86.131	68.355
22	6,000	0.00001099	0.0000108	1.85528752	1.69197392	1.2765504	6.16648991	0.03958366	0.09950963	0.04504237	-0.7916736	9.89549782	9.7679959	1.7717210	1.8150022	85696.910	-68287.77	6,000	85.704	68.445
23	8,000	0.00001099	0.0000109	1.85528752	1.69197392	0.00000212	1.04609261	0.03975581	0.09752399	0.04195504	-0.7951162	9.91731876	9.7944080	1.7774488	1.8157285	85499.461	-68448.42	8,000	85.504	68.533
24	10,000	0.00001099	0.0000109	1.85528752	1.69197392	1.2765504	1.54368509	0.03984782	0.09648066	0.04031428	-0.7969564	9.92878389	9.8082886	1.7804929	1.8162055	85396.208	-68534.66	10,000	85.399	68.588
25	12,000	0.00001099	0.0000109	1.85528752	1.69197392	0.00000212	2.08152489	0.03990162	0.09587552	0.03935754	-0.7980324	9.93543376	9.8163405	1.7822680	1.8164641	85336.484	-68585.15	12,000	85.339	68.622
26	16,000	0.00001099	0.0000109	1.85528752	1.69197392	1.2765504	3.18486980	0.03995802	0.09524446	0.03835618	-0.7991605	9.94236850	9.8247380	1.7841258	1.8167391	85274.334	-68638.12	16,000	85.276	68.658
27	20,000	0.00001099	0.0000109	1.85528752	1.69197392	0.00000212	4.22029733	0.03998518	0.09494185	0.03787476	-0.7997036	9.94569393	9.8287651	1.7850189	1.8168729	85244.581	-68663.62	20,000	85.245	68.676
28	30,000	0.00001099	0.0000109	1.85528752	1.69197392	1.2765504	6.21632600	0.04001266	0.09463612	0.03738759	-0.8002536	9.94905362	9.8328337	1.7859228	0.0000018	85214.553	-68689.46	30,000	85.215	68.695
29	40,000	0.00001099	0.0000109	1.85528752	1.69197392	1.2765504	7.44948139	0.04002247	0.09452746	0.03721427	-0.8004494	0.00000995	9.8342798	1.7862443	1.8170580	85203.889	-68698.65	40,000	85.204	68.702
30	50,000	0.00001099	0.0000109	1.85528752	1.69197392	1.2765504	8.20263657	0.04002703	0.09447687	0.03713354	-0.8005406	0.00000995	9.8349531	1.7863941	1.8170807	85198.925	-68702.94	50,000	85.199	68.705

## 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。

元のページ

<https://www.itoharu-tube.com/>