

# アクティブフィルターの設計と合成

基本回路と伝達関数、素子値の決定

Ver.2025.03.28

Ver.2025.05.10

Ver.2025.05.14

Ver.2025.05.20

Ver.2025.05.29

三浦 高志

## 目次

目次 .....	1
はじめに .....	7
基本回路と伝達関数 .....	8
1 次のローパスフィルタ基本回路 lp1 .....	8
1 次のハイパスフィルタ基本回路 hp1 .....	9
2 次のローパスフィルタ基本回路 LP1 .....	10
2 次のローパスフィルタ基本回路 LP2 .....	11
2 次のハイパスフィルタ基本回路 HP1 .....	12
2 次のハイパスフィルタ基本回路 HP2 .....	13
1 次のバンドパスフィルタ基本回路 BP1 .....	14
1 次のバンドパスフィルタ基本回路 BP2 .....	15
BE フィルタ及び各種フィルタ用の基本回路 BE1 .....	16
BE フィルタ及び各種フィルタ用の基本回路 BE2 .....	17
フィルタの遮断特性とフィルタ特性による回路の構成 .....	18
表の見方 .....	19
ローパスフィルタのファイル名と回路構成について、 .....	20
ハイパスフィルタのファイル名と回路構成について、 .....	20
バンドパスフィルタのファイル名と回路構成について、 .....	21
バンドエリミネーションフィルタのファイル名と回路構成について、 .....	22
ver.3.10 基本回路図を追加 .....	23
回路構成の例 .....	24
ローパスフィルタ .....	24
ハイパスフィルタ .....	28
バンドパスフィルタ .....	32
バンドエリミネーションフィルタ .....	36
LtAct のダイアログの用語と入力方法について .....	38
ローパスフィルタの場合 .....	38
バターワースを設計する時 .....	39
チェビシェフローパスフィルタの場合 .....	40
逆チェビシェフローパスフィルタの場合 .....	44
楕円関数ローパスフィルタの場合 .....	46
ハイパスフィルタ .....	48
バターワースフィルタを設計する時 .....	49
チェビシェフフィルタを設計する時 .....	50

逆チェビシェフフィルタを設計する時.....	51
楕円関数フィルタを設計する時 .....	52
バンドパスフィルタ .....	53
バターワースフィルタを設計する時 .....	54
チェビシェフ、逆チェビシェフ、楕円関数を設計する時.....	55
バンドエリミネーションフィルタ .....	56
バターワースフィルタを設計する時 .....	57
チェビシェフ、逆チェビシェフ、楕円関数を設計する時.....	58
LtAct によるフィルターの設計手順.....	59
設計 1 バターワース・ローパスフィルタ .....	59
1. 最初に、設計するフィルタの種類を決定する。 .....	59
4. 伝達関数の係数を出力します。「OK」を押します。 .....	60
6. 係数リスト(journal.txt)を確認する。 .....	61
7. 回路図のファイルを出力する。 .....	62
設計したフィルターを合成する .....	63
8. 回路図のファイル名を入力する。 .....	64
1 1. 2 番目の素子値も同様に「OK」を押す。 .....	65
1 4. 「LTSpice」で周波数特性をシミュレーションする。 .....	66
設計 2 楕円関数・ローパスフィルタ .....	67
パラメータの入力 .....	67
伝達関数の係数を確認する。 .....	68
回路図作成.....	69
周波数特性を確認する。 .....	70
回路図の素子値を確認する .....	71
設計 3 チェビシェフ・ハイパスフィルタ .....	72
周波数特性のグラフ .....	72
伝達関数の係数を確認 .....	72
回路図と周波数特性.....	73
素子値の確認 .....	73
設計 4 逆チェビシェフ・ハイパスフィルタ .....	74
フィルタの選択.....	74
周波数特性のグラフ .....	74
設計の結果.....	74
伝達関数の係数を確認 .....	75
回路図と周波数特性.....	75
素子値の確認 .....	76

設計 5 チェビシェフ・バンドパスフィルタ .....	77
周波数特性のグラフ .....	77
伝達関数の係数を確認 .....	77
回路図と周波数特性 .....	78
素子値の確認 .....	78
設計 6 楕円関数・バンドエリミネーションフィルタ .....	80
周波数特性のグラフ .....	80
伝達関数の係数を確認 .....	80
回路図と周波数特性 .....	81
素子値の確認 .....	81
設計 7 楕円関数・バンドパスフィルタ .....	83
伝達関数の係数 .....	83
調整後の周波数特性 .....	85
素子値の確認 .....	86
フィルタごとの伝達関数と素子値の決定方法 .....	88
ローパスフィルタ .....	88
バターワース 伝達関数 .....	88
チェビシェフ 伝達関数 .....	89
バターワースとチェビシェフ R,C 素子値の決定方法 .....	90
電卓ソフトで計算する .....	96
LP1 と LP2 の計算マクロと入力例 .....	105
逆チェビシェフ 伝達関数 .....	107
逆チェビシェフ R,C 素子値の決定 .....	108
楕円関数 伝達関数 .....	112
楕円関数 R,C 素子値の決定 .....	113
逆チェビシェフと楕円関数 LP3 と LP4 の計算マクロと入力の例 .....	117
ハイパスフィルタ .....	121
バターワース 伝達関数 .....	121
チェビシェフ 伝達関数 .....	122
バターワースとチェビシェフ R,C 素子値の決定 .....	123
バターワースとチェビシェフ HP1 と HP2 の計算マクロと入力の例 .....	127
逆チェビシェフ 伝達関数 .....	129
逆チェビシェフ R,C 素子値の決定 .....	130
楕円関数 伝達関数 .....	134
楕円関数 R,C 素子値の決定 .....	136
HP3 と HP4 の計算マクロ .....	140



バンドパスフィルタ .....	142
バターワース 伝達関数 .....	142
チェビシェフ 伝達関数 .....	143
バターワースとチェビシェフ R,C 素子値の決定 .....	144
逆チェビシェフ 伝達関数 .....	149
逆チェビシェフ R,C 素子値の決定 .....	152
楕円関数 伝達関数 .....	158
楕円関数 R,C 素子値の決定 .....	160
バンドパスフィルタ BP1 と BP2 の計算マクロ .....	167
バンドパスフィルタ BP3 と BP4 の計算マクロ .....	168
バンドエリミネーションフィルタ .....	170
バターワース 伝達関数 .....	170
チェビシェフ 伝達関数 .....	178
チェビシェフ R,C 素子値の決定 .....	179
逆チェビシェフ 伝達関数 .....	186
逆チェビシェフ R,C 素子値の決定 .....	188
楕円関数 伝達関数 .....	195
楕円関数 R,C 素子値の決定 .....	197
バンドエリミネーションフィルタ BE1 と BE2 の計算マクロ .....	206
伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ .....	208
ローパスフィルタ LP1 と LP2 の計算マクロ .....	208
lp1 の計算マクロ (1 次のローパスフィルタ) .....	208
LP1 の計算マクロ (2 次のローパスフィルタ) .....	210
<b>LP2 の計算マクロ</b> (2 次のローパスフィルタ) .....	211
ローパスフィルタ LP3 と LP4 の計算マクロ .....	212
et1 使用 逆チェビシェフローパスフィルタ .....	212
et1 使用 逆チェビシェフローパスフィルタ .....	212
et1 使用 楕円関数ローパスフィルタ .....	213
et2 使用 逆チェビシェフローパスフィルタ .....	215
et2 使用 楕円関数ローパスフィルタ .....	217
ハイパスフィルタ HP1 と HP2 の計算マクロ .....	219
hp1 の計算マクロ (1 次のハイパスフィルタ) .....	219
HP1 の計算マクロ (2 次のハイパスフィルタ) .....	221
HP2 の計算マクロ (2 次のハイパスフィルタ) .....	221
ハイパスフィルタ HP3 と HP4 の計算マクロ .....	224
et1 使用 逆チェビシェフハイパスフィルタ .....	224

et1 使用 楕円関数ハイパスフィルター .....	225
et2 使用 逆チェビシェフハイパスフィルター .....	227
et2 使用 楕円関数ハイパスフィルター .....	230
バンドパスフィルタ BP1 と BP2 の計算マクロ .....	234
バターワース、チェビシェフ バンドパスフィルター .....	234
バンドパスフィルタ BP3 と BP4 の計算マクロ .....	236
逆チェビシェフ、楕円関数 バンドパスフィルター .....	236
et1 を使用する場合 (BP3) .....	236
バンドエリミネーションフィルタ BE1 と BE2 の計算マクロ .....	239
et1 を使用する場合 (BE1) .....	239
et2 を使用する場合 (BE2) .....	240
基本回路とコンデンサの推奨値 .....	242
ローパスフィルタ .....	242
lp1 の C1 の値 .....	242
LP1 の C1_1 の値 .....	242
LP2 の C1_1 の値 .....	242
LP3 の Cb1_1 の値 .....	243
LP4 の Cb1_1 の値 .....	243
ハイパスフィルタ .....	244
hp1 の C1 の値 .....	244
HP1 の C1_1 の値 .....	244
HP2 の C1_1 の値 .....	244
HP3 の Cb1_1 の値 .....	245
HP4 の Cb1_1 の値 .....	245
バンドパスフィルタ .....	246
BP1 の C1_1 の値 .....	246
BP2 の C1_1 の値 .....	246
BP3(et1)の Cb1_1 の値 .....	246
BP4(et2)の Cb1_1 の値 .....	247
バンドイジェクト .....	248
BE1(et1)の Cb1_1 の値 .....	248
BE2(et2)の Cb1_1 の値 .....	248
楕円関数フィルタの伝達関数の係数を計算するサンプルプログラム .....	249
Vector で公開中のソフトとデータ .....	257



はじめに

## はじめに

「アクティブフィルタの設計と合成」をダウンロードしていただきまして、誠に有り難うございます。

現在 Vector より「LtAct」および「ActiveFilter-Design-Schematics」などのソフトウェアを公開しています。

<https://www.vector.co.jp/soft/winnt/edu/se521760.html>

<https://www.vector.co.jp/soft/winnt/edu/se525207.html>

上記ソフトウェアは、作成したいアクティブフィルタのカットオフ周波数と次数などのパラメータを入力するだけで、そのフィルタの伝達関数の係数を計算して、フリーで利用可能な Spice シミュレーション・ソフトウェア「LTSpice」用の回路図ファイルを出力できる、アクティブフィルタ設計支援ツールです。

フィルタの特性は、

ローパス、ハイパス、バンドパスおよびバンドエリミネーションの 4 種類

フィルタの遮断特性は、

バターワース、チェビシェフ、逆チェビシェフ及び楕円関数の 4 種類

2 次から 40 次までの各種フィルタの回路図が出力できます。

伝達関数の係数と素子値のリストは 2 次から 58 次までの計算が出来ます。

本書では、希望するアクティブフィルタのカットオフ周波数やフィルタの次数など最低限のパラメータを決定し、パラメータをフィルタの伝達関数に変換し、伝達関数の係数を使用する基本回路の抵抗値とコンデンサの値に変換する数式と手順をまとめました。

特に、楕円関数アクティブフィルタを設計・合成する手順を詳細に説明している書籍はほとんどなく、フィルタのパラメータを伝達関数の係数に変換する部分は手計算ではほとんど不可能なのでサンプルプログラムを「楕円関数フィルタの伝達関数の係数を計算するサンプルプログラム」の章に紹介しました。

さらに詳しい説明が必要ならば、公開中のソフトウェアに同梱されている資料「アクティブフィルタの設計.pdf」や「LtAct 操作説明書.pdf」などを参照してください。

伝達関数の係数はテキストとして出力されますから、楕円関数ローパスフィルタの係数を利用して、LC フィルタに変換するプログラムを開発することも出来ると思います。

「LtAct」を改良したソフトウェアを開発したい場合の参考になれば幸いです。

三浦 高志 2025/03/20

## 基本回路と伝達関数

Diagram of the basic circuit block

1 次のローパスフィルタ基本回路 lp1

1st order low-pass filter basic circuit lp1

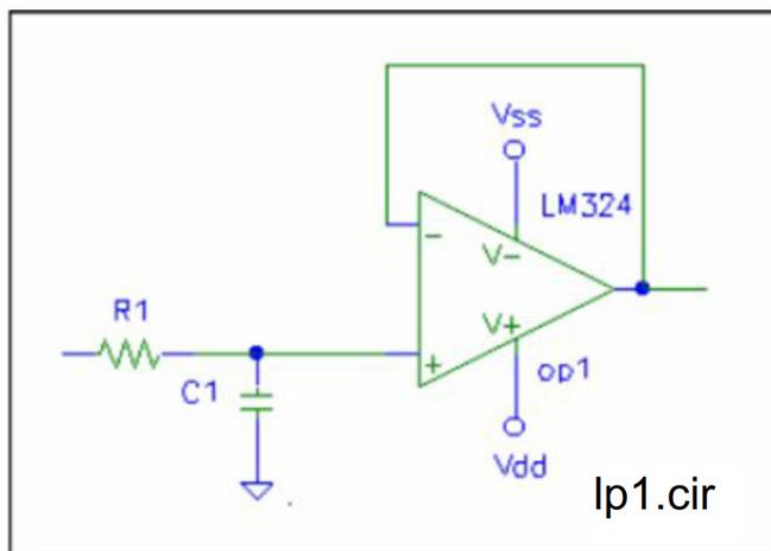


図 2-1 1 次のローパスフィルタ基本回路 1 lp1\_1.cir

Figure 2-1 1st order low-pass filter basic circuit lp1.cir

lp1\_cir の伝達関数

transfer function of lp1.cir

$$H_1(\omega_p, s) = \frac{(1/C_1 R_1)}{s + (1/C_1 R_1)} \quad (2-1)$$

奇数次数の各種ローパスフィルタに使用される。

Used for various low-pass filters of odd order.

## 1 次のハイパスフィルタ基本回路 hp1

1st-order high-pass filter basic circuit hp1

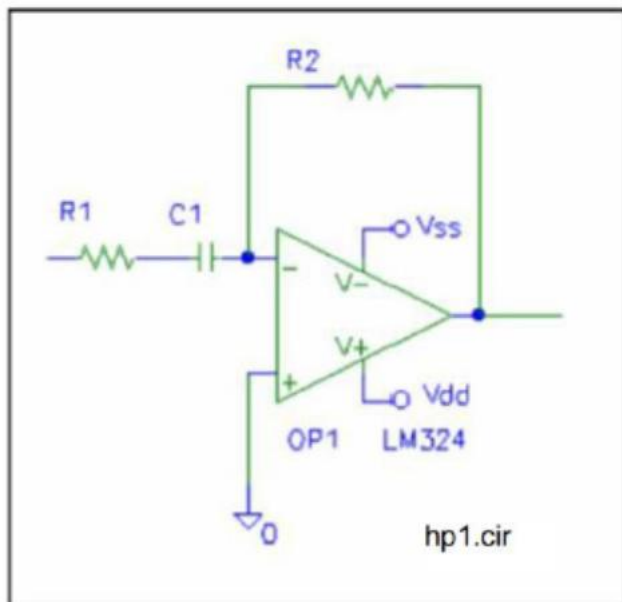


図 4 - 1 1 次のハイパスフィルタ基本回路 hp1.cir

Figure 4-1 1st-order high-pass filter basic circuit hp1.cir

hp1.cirの伝達関数

Transfer function of hp1.cir

$$H_1(\omega_p, s) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{s}{s + (1/C_1 R_1)} \quad (4-1)$$

奇数次数の各種ハイパスフィルタに使用される。

Used for various odd-order high-pass filters.

## 2 次のローパスフィルタ基本回路 LP1

2nd order low-pass filter basic circuit LP1

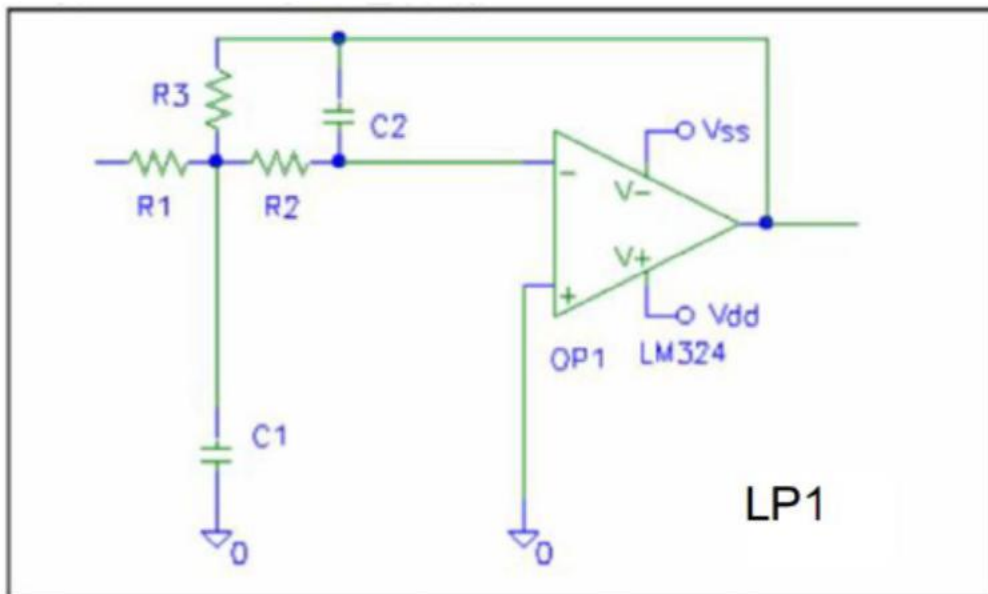


図 2-3 2 次のローパスフィルタ基本回路 LP1 (lpat1\_2.cir)

Figure 2-3 2nd order low-pass filter basic circuit LP1 (lpat1\_2.cir)

LP1 の伝達関数

Transfer function of LP1

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{-\left(\frac{R_3}{R_1}\right)\left(\frac{1}{C_1 C_2 R_2 R_3}\right)}{s^2 + \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{C_1 R_1 R_2 R_3} s + \left(\frac{1}{C_1 C_2 R_2 R_3}\right)} \quad (2-3)$$

$$C_2 = C, C_1 = m \cdot C, R_1 = R, R_2 = k \cdot R, R_3 = R$$

$k = 1, m = 9 \cdot Q_k^2$  に設定する。

## 2 次のローパスフィルタ基本回路 LP2

2nd order low-pass filter basic circuit LP2

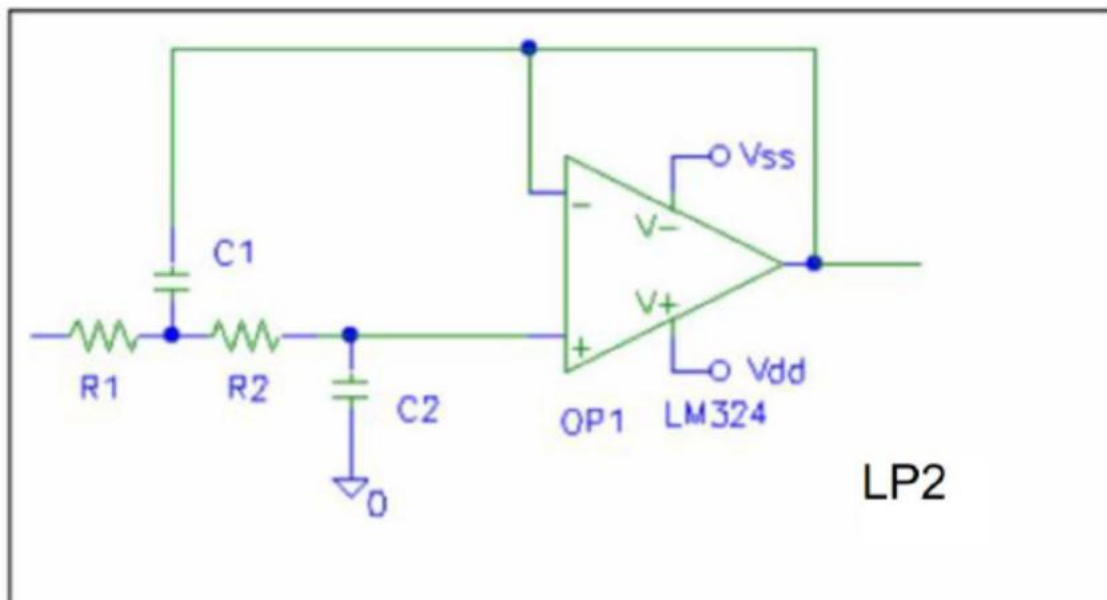


図 2-4 2 次のローパスフィルタ基本回路 LP2 (lpat2\_2.cir)

Figure 2-4 Quadratic function low-pass filter basic circuit LP2 (lpat2\_2.cir)

LP2 の伝達関数

Transfer function of LP2

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{1}{s^2 + \frac{R_1 + R_2}{C_1 R_1 R_2} s + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (2-4)$$

$$C_1 = mC, C_2 = C, R_1 = R, R_2 = kR$$

$k = 1, m = 4 \cdot Q_k^2$  に設定する。



## 2 次のハイパスフィルタ基本回路 HP1

2nd order high-pass filter basic circuit HP1

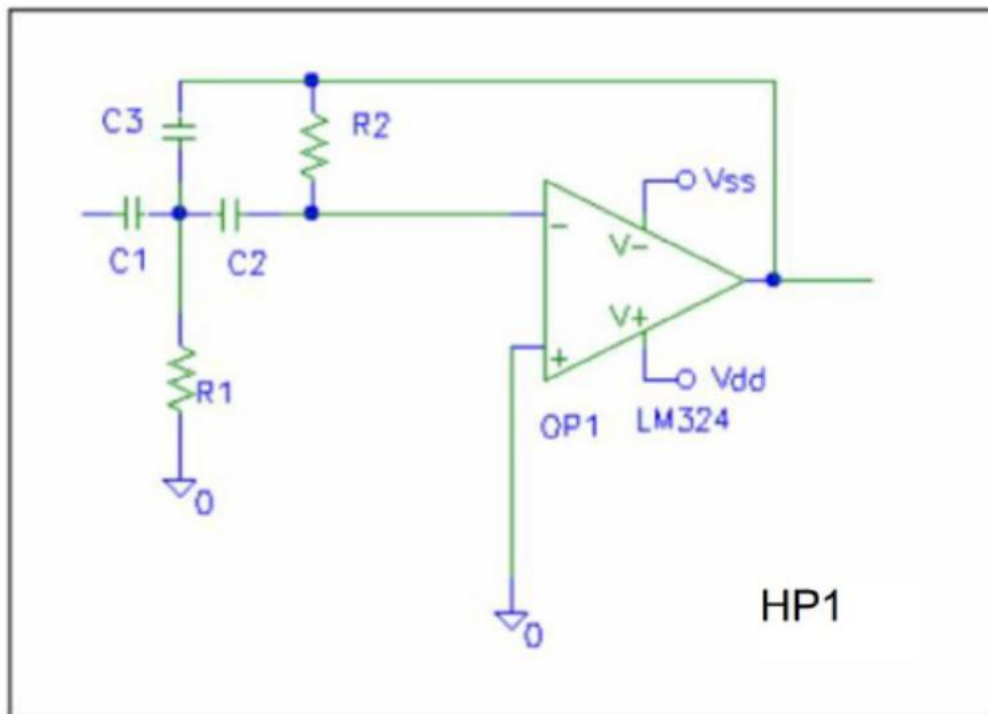


図 4-2 2 次のハイパスフィルタ基本回路 HP 1 (hpat1\_2.cir)

Figure 4-2 2nd order high-pass filter basic circuit HP1 (hpat1\_2.cir)

HP 1 の伝達関数

Transfer function of HP1

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{C_1}{C_3} \frac{s^2}{s^2 + \frac{C_1 + C_2 + C_3}{C_2 C_3 R_2} s + \frac{1}{C_2 C_3 R_1 R_2}} \quad (4-2)$$

$$C_1 = C, C_2 = m \cdot C, C_3 = C, R_1 = R, R_2 = k \cdot R$$

$m = 1, k = 9 \cdot Q_k^2$  に設定する。

## 2 次のハイパスフィルタ基本回路 HP2

2nd order high-pass filter basic circuit HP2

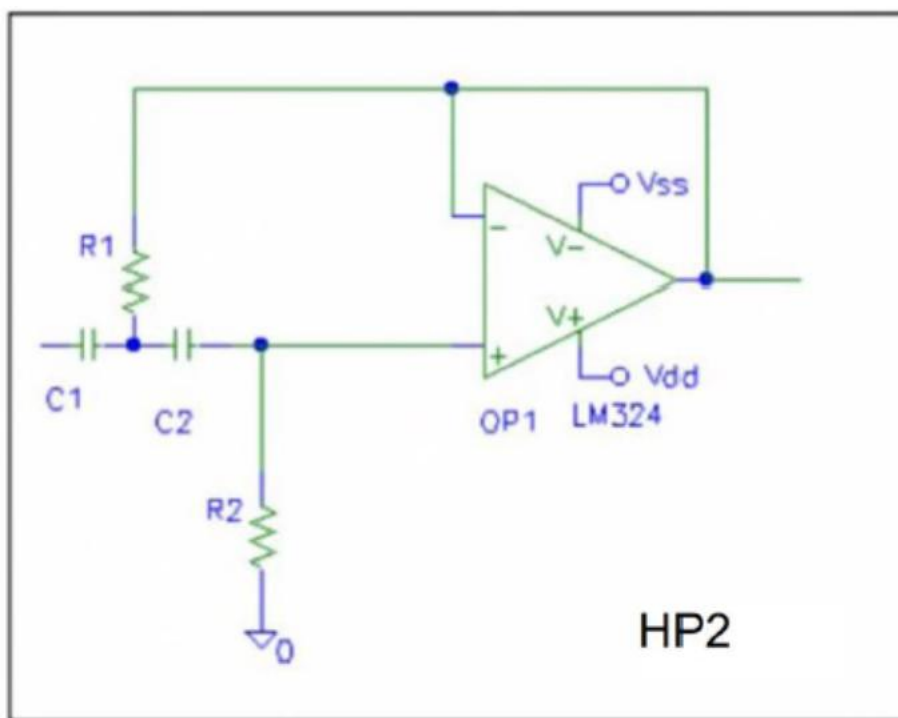


図 4－3 2 次のハイパスフィルタ基本回路 HP 2 (hpat2\_2.cir)

Figure 4-3 2nd order high-pass filter basic circuit HP2 (hpat2\_2.cir)

HP 2 の伝達関数

Transfer function of HP2

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 R_2} s + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4-3)$$

$$C_1 = mC, C_2 = C, R_1 = R, R_2 = kR$$

$m = 1, k = 4 \cdot Q_k^2$  に設定する。

## 1 次のバンドパスフィルタ基本回路 BP1

1st order bandpass filter basic circuit BP1

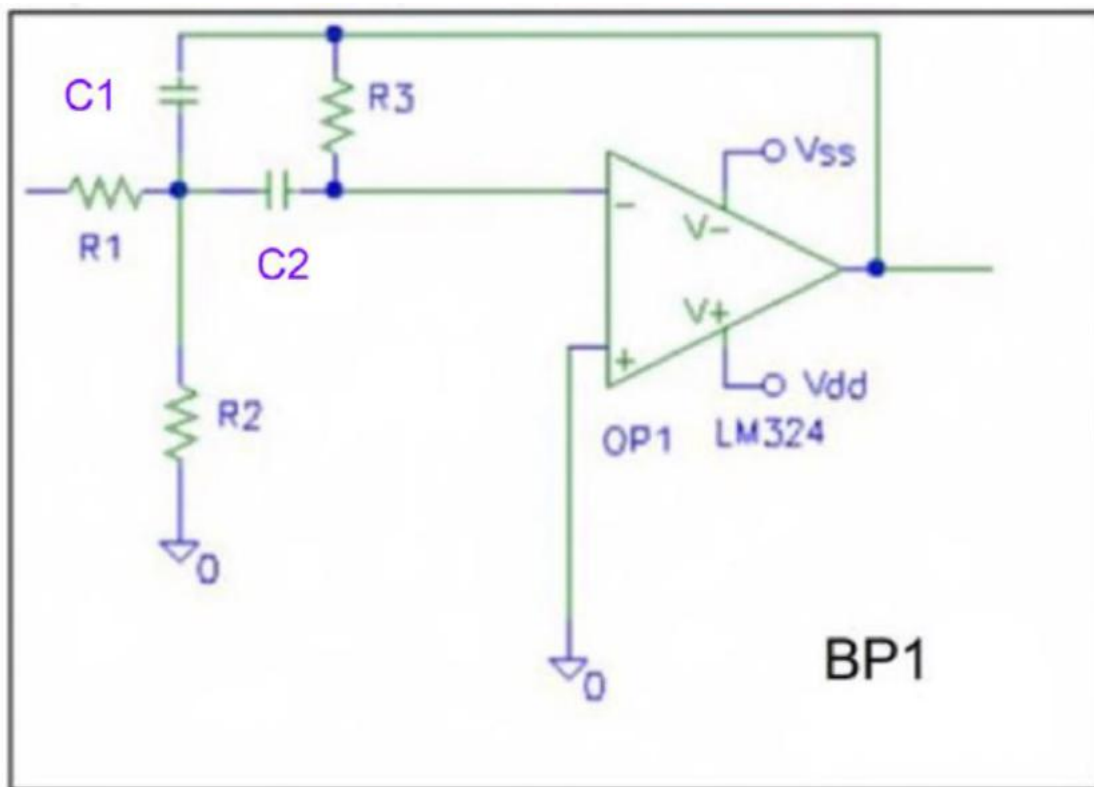


図 6 - 1 1 次のバンドパスフィルタ基本回路 B P 1 (bpat1.cir)

Figure 6-1 1st order bandpass filter basic circuit BP1 (bpat1.cir)

B P 1 の伝達関数

Transfer function of BP1

$$H_1(\omega_p, s) = -\frac{R_3}{2R_1} \frac{\frac{2}{CR_3}s}{s^2 + \frac{2}{CR_3}s + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C^2}} \quad (6-1)$$

## 1 次のバンドパスフィルタ基本回路 BP2

1st order bandpass filter basic circuit BP2

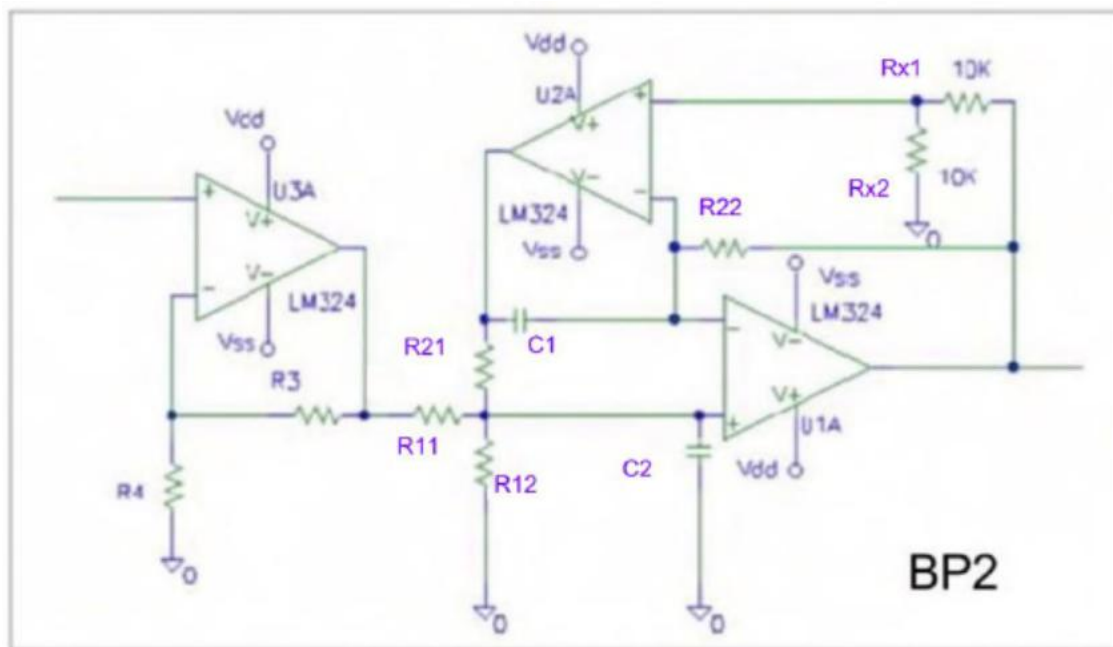


図 6 - 2 1 次のバンドパスフィルタ基本回路 B P 2 (bpat2.cir)

Figure 6-2 1st order bandpass filter basic circuit BP2 (bpat2.cir)

B P 2 の伝達関数

Transfer function of BP2

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_4 + R_3}{R_4} \frac{\frac{2}{CR_1} s}{s^2 + \frac{2}{CR_1} s + \left(\frac{1}{CR_2}\right)^2} \quad (6-2)$$

「LtAct」の計算値が  $R_3 = 0$  になる時には、「LTSpice」では素子値に 0 を使用することが出来ないで、「LtAct」は  $R_3 = 10\text{m}$  (0.01) を出力します。

When the calculated value of "LtAct" is  $R_3 = 0$ , "LTSpice" cannot use 0 for the element value, so "LtAct" outputs  $R_3 = 10\text{m}$  (0.01).

## BE フィルタ及び各種フィルタ用の基本回路 BE1

Basic circuits for BE filters and various filters BE1

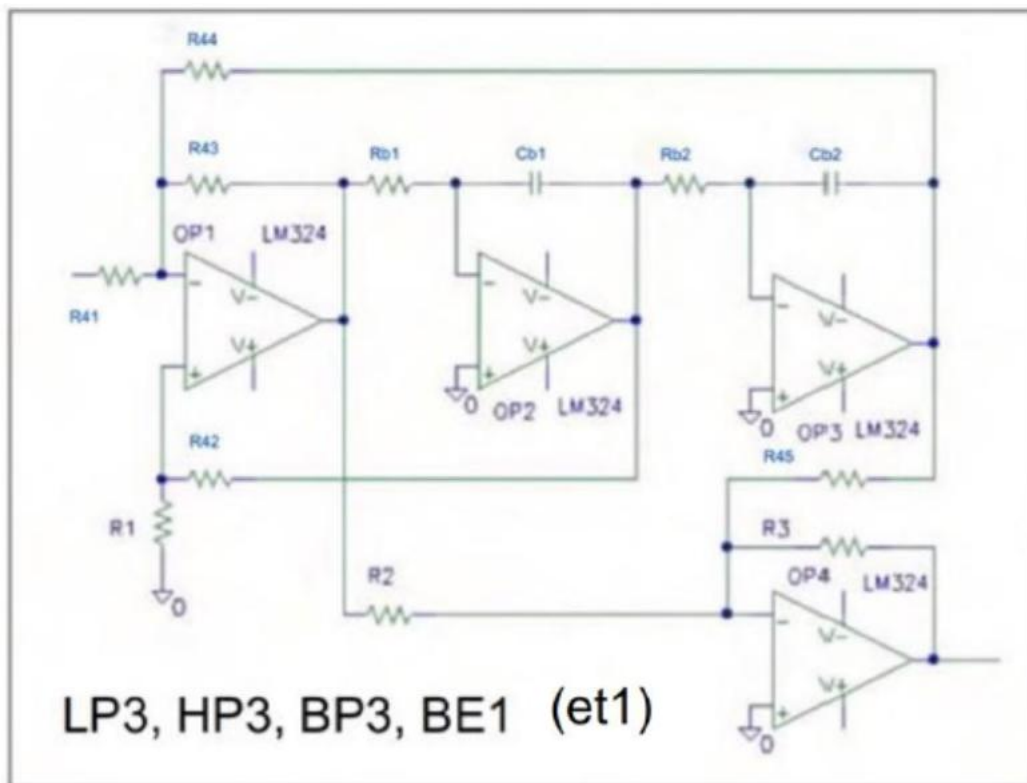


図 2-5 2 次のローパスフィルタその他で利用される基本回路 (lpet1\_2.cir)

Figure 2-5 Basic circuit used in secondary low-pass filters and others (lpet1\_2.cir)

この回路はLP3, HP3, BP3, BE1、ハイパス、バンドパス、BEフィルタでも使用される。

This circuit is also used in LP3, HP3, BP3, BE1, highpass, bandpass and BE filters.

et1(LP3, HP3, BP3, BE1)の伝達関数

Transfer functions of et1(LP3, HP3, BP3 and BE1)

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

$R = R_{41} \sim R_{45}$  は任意に設定する 「LtAct」 のver.3.30では 10K に設定している。

## BE フィルタ及び各種フィルタ用の基本回路 BE2

Basic circuits for BE filters and various filters BE2

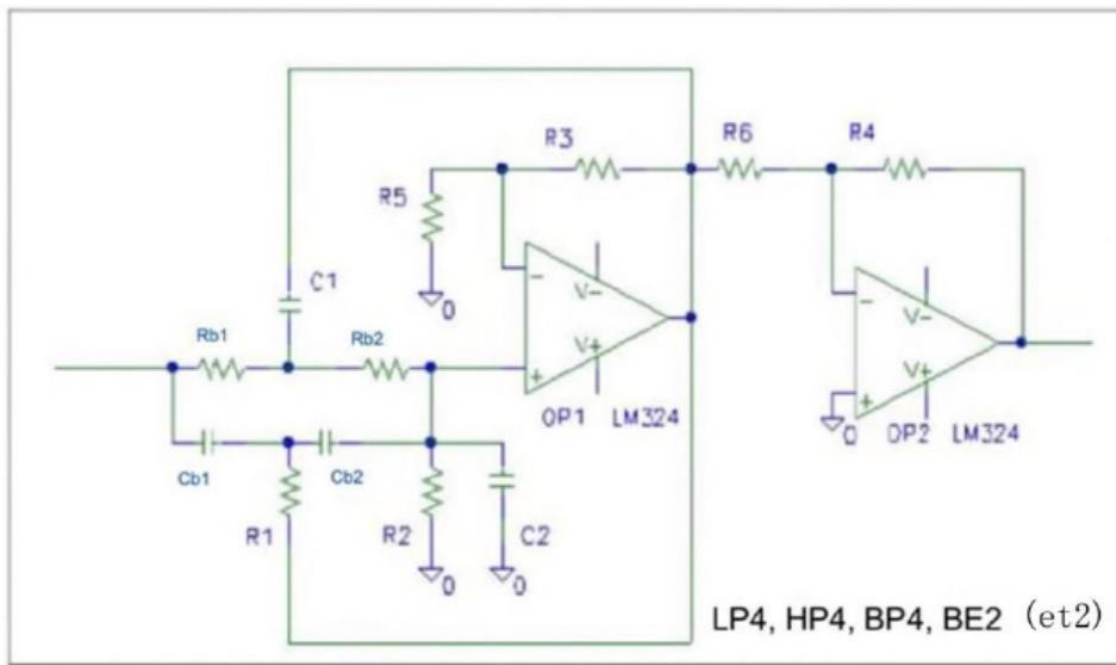


図 2-6 2 次のローパスフィルタその他で利用される基本回路 (lpet2\_2.cir)

Figure 2-6 Basic circuit used in secondary low-pass filters and others (lpet2\_2.cir)

この回路はLP4, HP4, BP4, BE2、ハイパス、バンドパス、BEフィルタでも使用される。

This circuit is also used in LP4, HP4, BP4, BE2, highpass, bandpass and BE filters.

et2(LP4, HP4, BP4, BE2)の伝達関数

Transfer functions of et2(LP4, HP4, BP4 and BE2)

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

$R_5$  と  $R_6$  は 10K に固定されている

## フィルタの遮断特性とフィルタ特性による回路の構成

ローパス 次数 $n = 2m(+1)$	バターワース 及び チェビシェフ	逆チェビシェフ 及び 楕円関数
ファイル名 →	LP1_n $n = 2m(+1)$	LP3_n $n = 2m(+1)$
回路構成 →	(lp1 +) LP1 * m	(lp1 +) et1 * m
ファイル名 →	LP2_n $n = 2m(+1)$	LP4_n $n = 2m(+1)$
回路構成 →	(lp1 +) LP2 * m	(lp1 +) et2 * m
ハイパス 次数 $n = 2m(+1)$	バターワース 及び チェビシェフ	逆チェビシェフ 及び 楕円関数
ファイル名 →	HP1_n $n = 2m(+1)$	HP3_n $n = 2m(+1)$
回路構成 →	(hp1 +) HP1 * m	(hp1 +) et1 * m
ファイル名 →	HP2_n $n = 2m(+1)$	HP4_n $n = 2m(+1)$
回路構成 →	(hp1 +) HP2 * m	(hp1 +) et2 * m
バンドパス 次数 $n = 2m(+1)$	バターワース 及び チェビシェフ	逆チェビシェフ 及び 楕円関数
ファイル名 →	BP1_n	BP3_n $n = 2m(+1)$
回路構成 →	BP1 * n	(BP2+) et1 * 2m
ファイル名 →	BP2_n	BP4_n $n = 2m(+1)$
回路構成 →	BP2 * n	(BP2+) et2 * 2m
バンドエリミネーション 次数 n	バターワース 及び チェビシェフ	逆チェビシェフ 及び 楕円関数
ファイル名 →	BE1_n	BE1_n
回路構成 →	et1 * n	et1 * n
ファイル名 →	BE2_n	BE2_n
回路構成 →	et2 * n	et2 * n

## 表の見方

表の左端「ローパス」の右側の「バターワース及びチェビシェフ」の下段に、「ファイル名／回路構成」が2段表示されています。これは、「LtAct」で回路図を作成する時に基本回路として「LP1」または「LP2」が選択できることを表しています。

右端の「逆チェビシェフ及び楕円関数」の下段にも「ファイル名／回路構成」が2段表示されており、基本回路として「LP3」または「LP4」が選択できることを表しています。

ファイル名の「LP1\_n  $n = 2m(+1)$ 」は、ファイル名が「LP1\_n」となる事を表します。

nはフィルタの次数で、nが奇数なら  $n = 2m + 1$ 、偶数なら  $n = 2m$  と表されます。

回路構成の「(lp1+)LP1 \* m」は、nが奇数なら、lp1とm個のLP1を使用することを表します。

そしてnが偶数なら、m個のLP1を使用することを表します。

「ファイル名」が「LP2\_n  $n = 2m(+1)$ 」、「LP3\_n  $n = 2m(+1)$ 」と「LP4\_n  $n = 2m(+1)$ 」についても、ファイル名「LP2\_n」、「LP3\_n」と「LP4\_n」と次数ごとの基本回路 lp1 と「LP2」、「LP3(et1)」と「LP4(et2)」の使用方法は同様になります。

ハイパスはローパスと同様です。ファイル名は、「バターワース及びチェビシェフ」は「HP1\_n」または「HP2\_n」、「逆チェビシェフ及び楕円関数」は「HP3\_n」または「HP4\_n」となります。回路構成は、lp1の代わりにhp1が使われます。

バンドパスの「逆チェビシェフ及び楕円関数」は、基本回路が「BP3」ではnが偶数なら「et1」を2m個使用し、奇数なら「BP2」と「et1」を2m個使用します。「BP4」では「et1」の代わりに「et2」を使用します。

バンドパスの「バターワース及びチェビシェフ」及びバンドエリミネーションでは、次数nと同じ個数の基本回路（BP1またはBP2、BE1(et1)またはBE2(et2))を使用します。



フィルタの遮断特性とフィルタ特性による回路の構成

ローパスフィルタのファイル名と回路構成について

て、

**ローパスフィルタのファイル名と回路構成について、**

例えば、バターワース又はチェビシェフのローパスフィルタのファイル名は、LP1\_または LP2\_ に次数の数字が付きます。LP1\_2.asc や LP2\_7.asc のようになります。

フィルタの回路は後で表示する基本回路を組み合わせて作られます。

例えば、LP1\_7.asc のように 7 次の奇数次数のローパスフィルタでは、 $7 = 2 * 3 + 1$  なので、表より 1 次のローパスフィルタ「lp1」を 1 個と 2 次のローパスフィルタ「LP1」を 3 個使用します。

LP2\_6.asc のように次数が偶数の時には、 $6 = 2 * 3$  なので、2 次のローパスフィルタ「LP2」を 3 個使用します。

逆チェビシェフまたは楕円関数フィルタの場合には、LP3\_または LP4\_ に次数の数字が付きます。

LP3\_2.asc や LP4\_7.asc のようになります。

LP3\_7.asc のように奇数次数の場合には、 $7 = 2 * 3 + 1$  なので、1 次のローパスフィルタ「lp1」を 1 個と、2 次のローパスフィルタ「et1」を 3 個使用します。

LP4\_6.asc のように偶数の時には、 $6 = 2 * 3$  なので、2 次のローパスフィルタ「et2」を 3 個使用します。

**ハイパスフィルタのファイル名と回路構成について、**

バターワース又はチェビシェフのハイパスフィルタのファイル名は、HP1\_または HP2\_ に次数の数字が付きます。HP1\_2.asc や HP2\_7.asc のようになります。

HP1\_7.asc のように奇数次数の場合には、 $7 = 2 * 3 + 1$  なので、1 次のハイパスフィルタ「hp1」を 1 個と、2 次のハイパスフィルタ「HP1」を 3 個使用します。

HP2\_6.asc のように偶数の時には、 $6 = 2 * 3$  なので、2 次のハイパスフィルタ「HP2」を 3 個使用します。

逆チェビシェフまたは楕円関数フィルタの場合には、HP3\_または HP4\_ に次数の数字が付きます。HP3\_2.asc や HP4\_7.asc のようになります。

回路構成は、HP3\_7.asc のように奇数次数の場合には、 $7 = 2 * 3 + 1$  なので、1 次のハイパスフィルタ「hp1」を 1 個と、2 次のハイパスフィルタ「et1」を 3 個使用します。

HP4\_6.asc のように偶数の時には、 $6 = 2 * 3$  なので、2 次のハイパスフィルタ「et2」を 3 個使用します。

フィルタの遮断特性とフィルタ特性による回路の構成

バンドパスフィルタのファイル名と回路構成につ

いて、

**バンドパスフィルタのファイル名と回路構成について、**

バターワース又はチェビシェフのバンドパスフィルタのファイル名は、BP1\_または BP2\_ に次数の数字が付きます。BP1\_2.asc や BP2\_7.asc のようになります。

BP1\_n では、1 次のバンドパスフィルタ「BP1」を次数と同じ n 個使用します。

BP2\_n では、1 次のバンドパスフィルタ「BP2」を次数と同じ n 個使用します。

逆チェビシェフまたは楕円関数フィルタの場合には、BP3\_または BP4\_ に次数の数字が付きます。

BP3\_2.asc や BP4\_7.asc のようになります。

回路構成は、BP3\_7.asc のように奇数次数の場合には、 $7 = 6 + 1$  なので、1 次のバンドパスフィルタ「BP2」を 1 個と、1 次のバンドパスフィルタ「et1」を 6 個使用します。

BP4\_6.asc のように偶数の時には、1 次のバンドパスフィルタ「et2」を 6 個使用します。

注意：「et1」と「et2」はローパスまたはハイパスで使用する時は 2 次の基本回路ですが、バンドパスまたはバンドエリミネーションで使用する時は 1 次の基本回路です。

フィルタの遮断特性とフィルタ特性による回路の構成

バンドエリミネーションフィルタのファイル名と

回路構成について、

**バンドエリミネーションフィルタのファイル名と回路構成について、**

バターワース、チェビシェフ、逆チェビシェフおよび楕円関数のバンドエリミネーションフィルタのファイル名は BE1\_ または BE2\_ に次数の数字が付きます。

BE1\_2.asc や BE2\_7.asc のようになります。

BE1\_n では、1 次の BE フィルタ「et1」を次数と同じ n 個使用します。

BE2\_n では、1 次の BE フィルタ「et2」を次数と同じ n 個使用します。

回路構成は、BE1\_7.asc の場合には、1 次の BE フィルタ「et1」を次数と同じ 7 個使用します。

BE2\_6.asc では、1 次の BE フィルタ「et2」を次数と同じ 6 個使用します。

BE フィルタではバターワース・チェビシェフ・逆チェビシェフ・楕円関数の全てに対して、基本回路ブロックが BE1 (et1) または BE2 (et2) のファイル名が付けられます。

必要に応じて逆チェビシェフ・楕円関数の場合には BE3\_n または BE4\_n に名前を変えて保存すると区別しやすいかもしれません。

「LTSpice 操作入門」 ver.1.2 をインストールしたフォルダの「LtSpice 用サンプル回路図」フォルダのファイルは全て「LtAct」が出力した回路図ファイルです。

<https://www.vector.co.jp/vpack/browse/person/an008575.html>

バターワースやチェビシェフの回路図と区別するために、逆チェビシェフは BE3\_n に、楕円関数は BE4\_n にファイル名を変えて保存しました。

「journal.txt」も一緒に収納しています。

バターワース以外の BE フィルタは、奇数次数が高くなると回路が作れないというメッセージが表示されることがあるので、「journal.txt」を参考にして、リプルや倍率 Xs を調整して下さい。奇数次数でも回路図を作ることは出来るのですが、適切なパラメータを見つけることは多少困難です。

## ver.3.10 基本回路図を追加

基本回路図を追加して 40 次までの偶数次数の回路図を出力可能としました。

ローパス	従来使用できた基本回路	LtAct ver.3.10で追加した次数	追加した基本回路数	合計の基本回路数
パターワース・チェビシェフ LP1 と LP2	2次から10次まで18個 奇数次数も偶数次数も可能	12次から40次まで 偶数次数のみ可能	30	48
逆チェビシェフ・楕円関数 LP3 と LP4	2次から10次まで18個 奇数次数も偶数次数も可能	12次から40次まで 偶数次数のみ可能	30	48
ハイパス	従来使用できた基本回路	LtAct ver.3.10で追加した次数	追加した基本回路数	合計の基本回路数
パターワース・チェビシェフ HP1 と HP2	2次から10次まで18個 奇数次数も偶数次数も可能	12次から40次まで 偶数次数のみ可能	30	48
逆チェビシェフ・楕円関数 HP3 と HP4	2次から10次まで18個 奇数次数も偶数次数も可能	12次から40次まで 偶数次数のみ可能	30	48
バンドパス	従来使用できた基本回路	LtAct ver.3.10で追加した次数	追加した基本回路数	合計の基本回路数
パターワース・チェビシェフ BP1 と BP2	2次から10次まで18個 奇数次数も偶数次数も可能	12次から20次まで 偶数次数のみ可能	10	28
逆チェビシェフ・楕円関数 BP3 と BP4	2次から10次まで18個 奇数次数も偶数次数も可能	12次から20次まで 偶数次数のみ可能	10	28
バンドエリミネーション	従来使用できた基本回路	LtAct ver.3.10で追加した次数	追加した基本回路数	合計の基本回路数
パターワース・チェビシェフ BE1 と BE2	2次から10次まで18個 奇数次数も偶数次数も可能	12次から20次まで 偶数次数のみ可能	10	28
逆チェビシェフ・楕円関数 BE1 と BE2	2次から10次まで 共通 奇数次数も偶数次数も可能	12次から20次まで 共通 偶数次数のみ可能	合計 150 個 追加	合計 276 個

## 回路構成の例

### ローパスフィルタ

#### バターワースとチェビシェフ

バターワースとチェビシェフのローパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

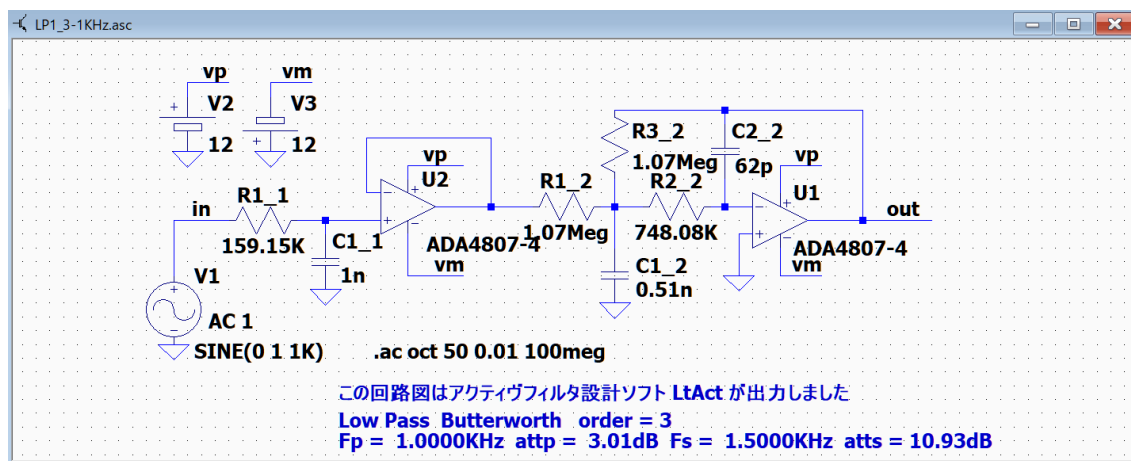
1 次のフィルタ lp1 の後に、2 次のフィルタ（LP1 または LP2）が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

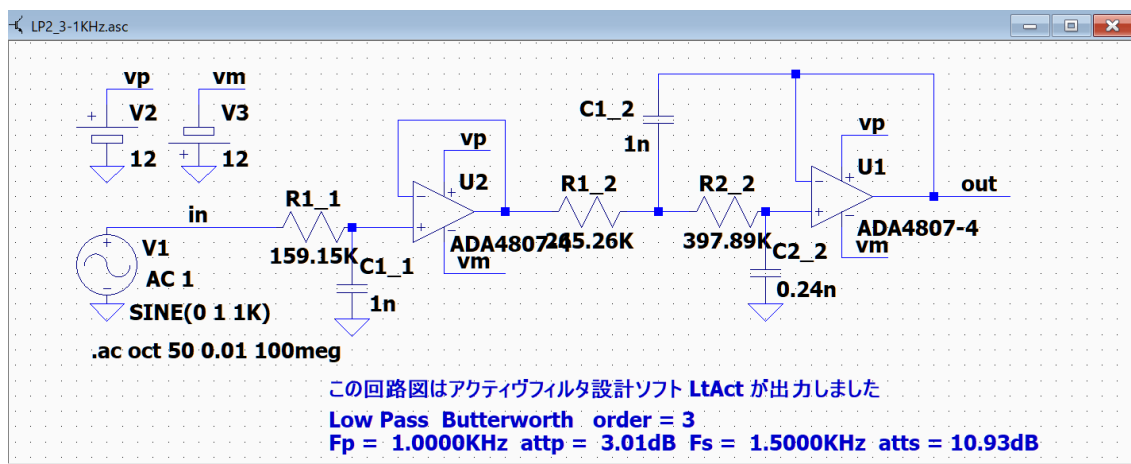
2 次のフィルタ（LP1 または LP2）が複数個使用されます。

次数が奇数の例

lp1 と LP1 を使用する例



lp1 と LP2 を使用する例



バターワースとチェビシェフのローパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

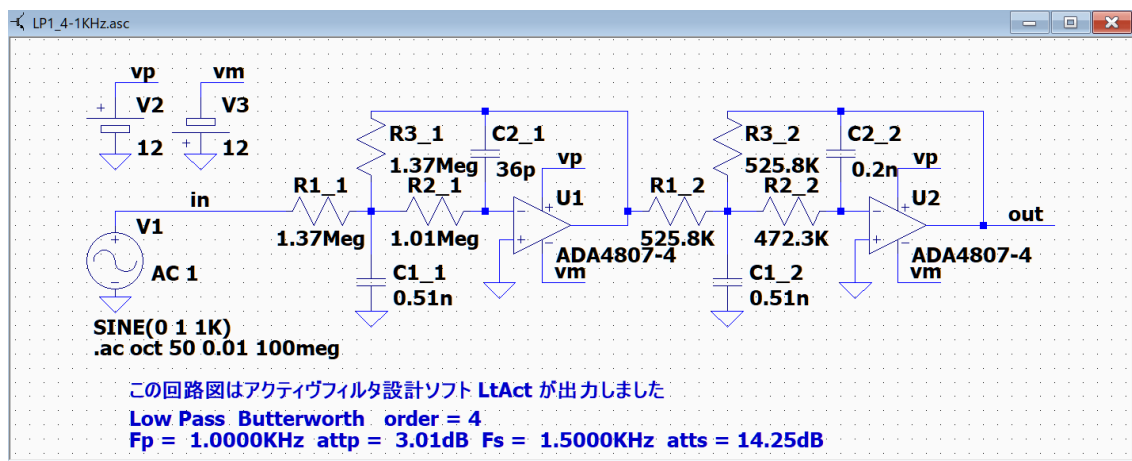
1 次のフィルタ lp1 の後に、2 次のフィルタ（LP1 または LP2）が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

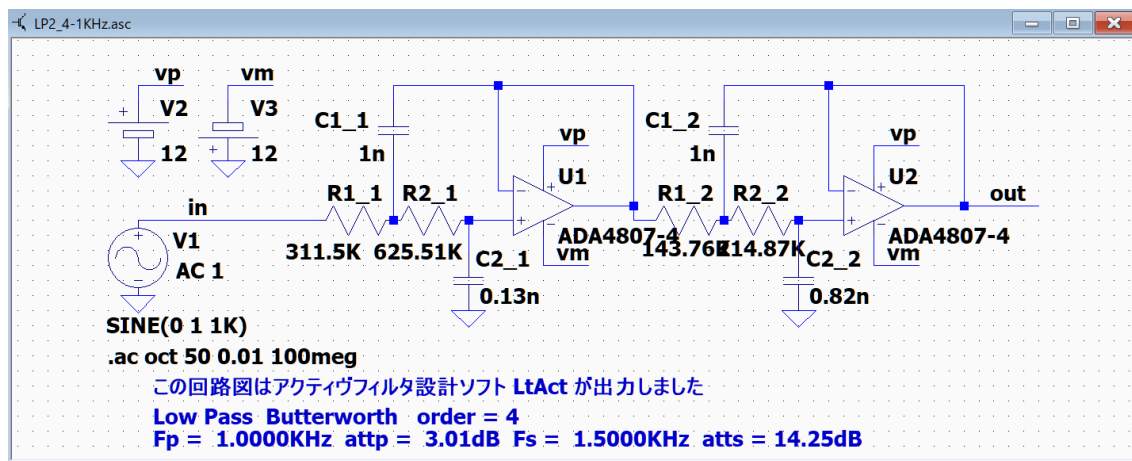
2 次のフィルタ（LP1 または LP2）が複数個使用されます。

次数が偶数の例

LP1 を使用する例



LP2 を使用する例



## 逆チェビシェフと楕円関数

逆チェビシェフと楕円関数のローパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

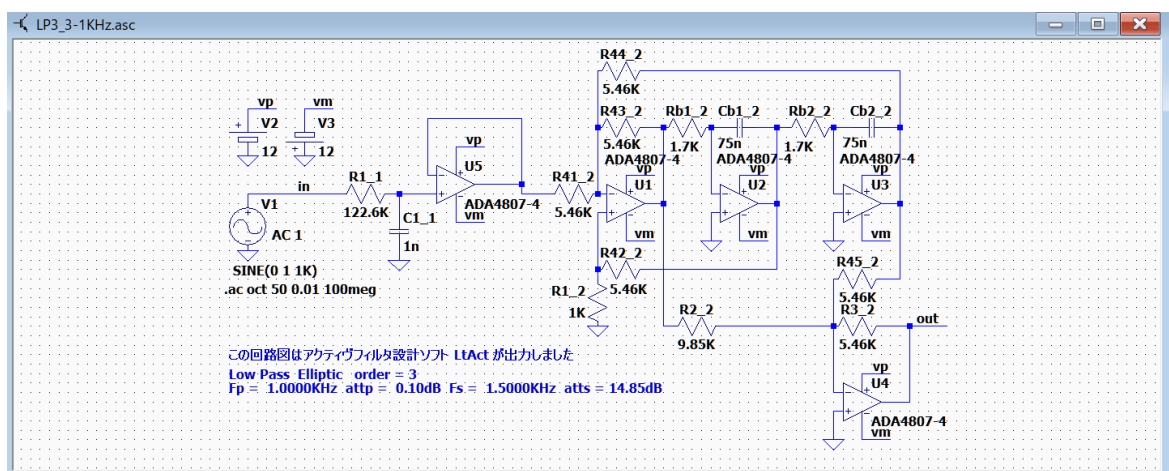
1 次のフィルタ lp1 の後に、2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

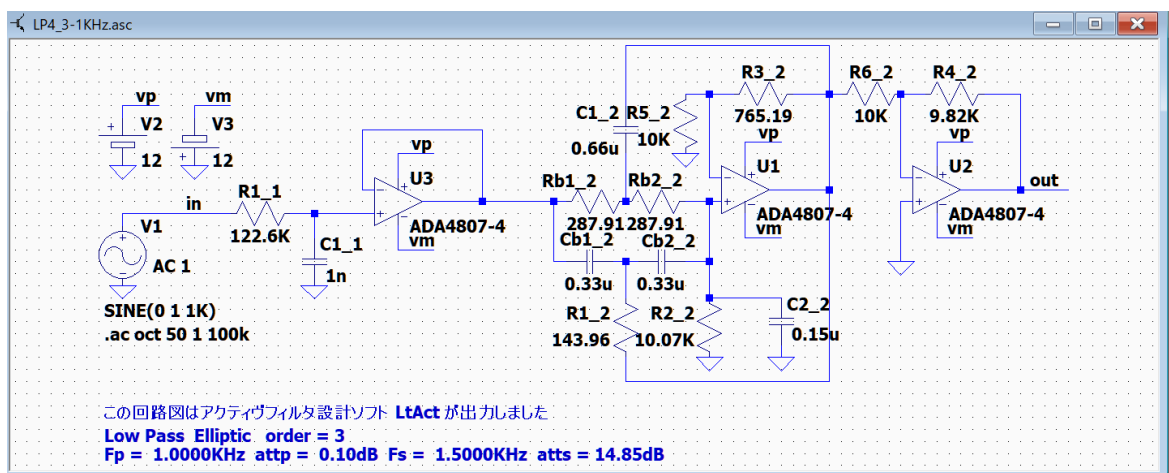
2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

次数が奇数の例

lp1 と et1 を使用する例



lp1 と et2 を使用する例



逆チェビシェフと楕円関数のローパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

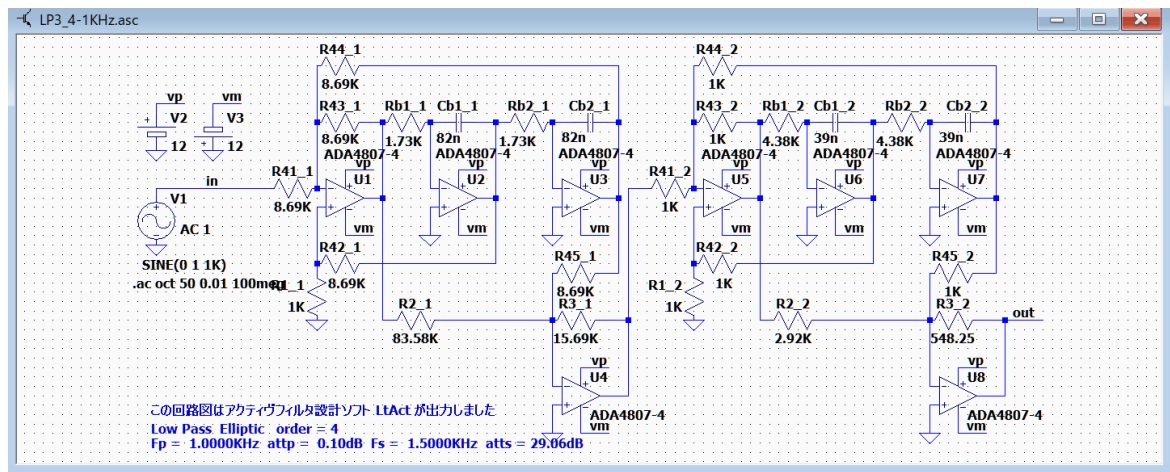
1 次のフィルタ lp1 の後に、2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

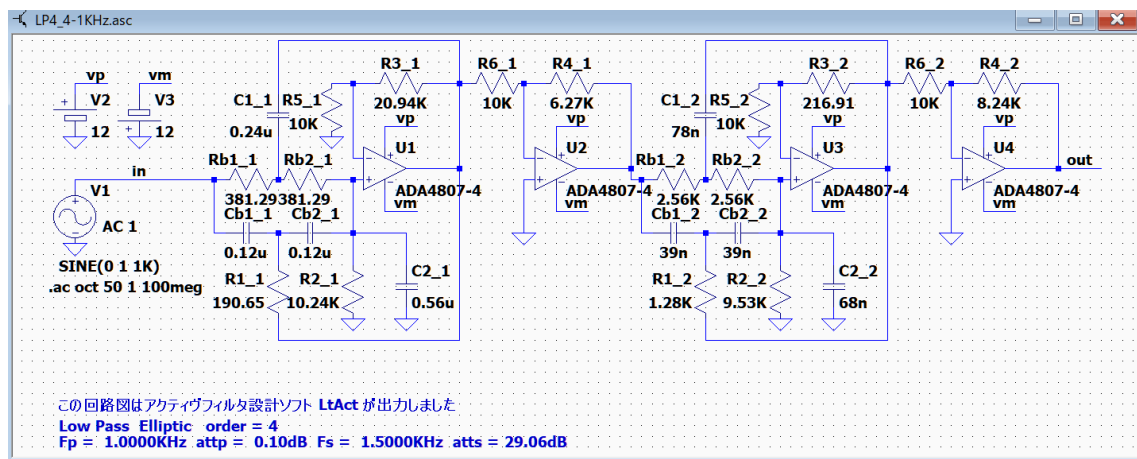
2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

次数が偶数の例

et1 を使用する例



et2 を使用する例

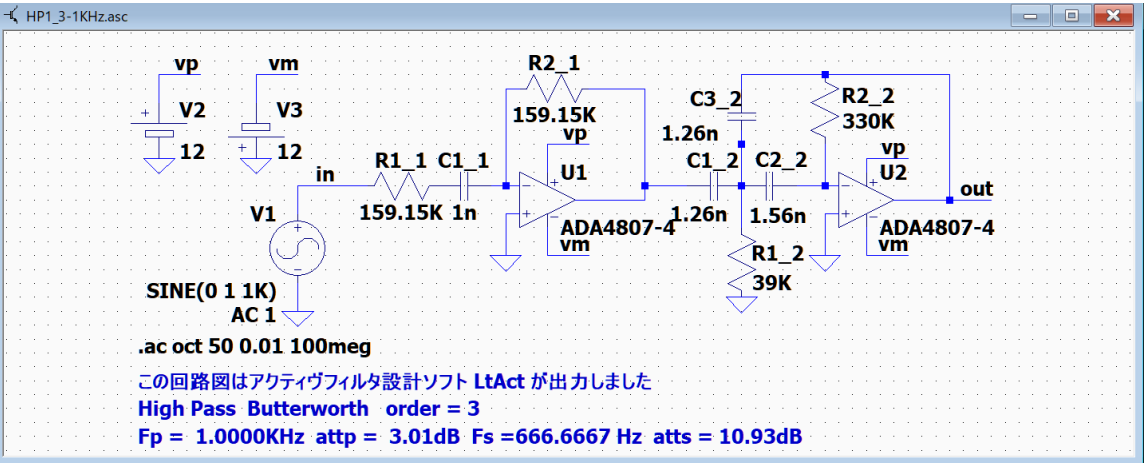




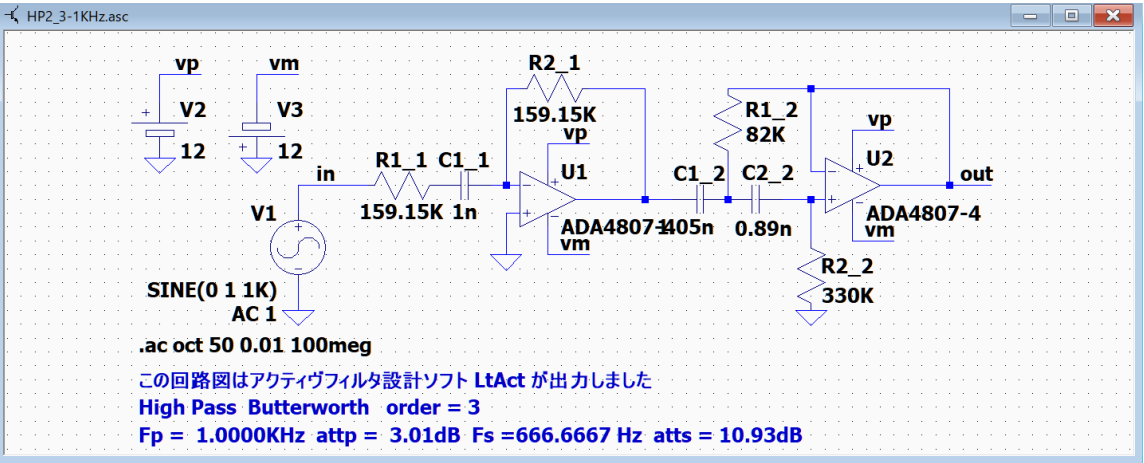
ハイパスフィルタ  
バターワースとチェビシェフ

バターワースとチェビシェフのハイパスフィルタの構成は、  
フィルタの次数が奇数の場合は、  
1 次のフィルタ hp1 の後に、2 次のフィルタ（HP1 または HP2）が複数個使用されます。  
フィルタの次数が偶数の場合は、  
2 次のフィルタ（HP1 または HP2）が複数個使用されます。

次数が奇数の例  
hp1 と HP1 を使用する例



hp1 と HP2 を使用する例



バターワースとチェビシェフのハイパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

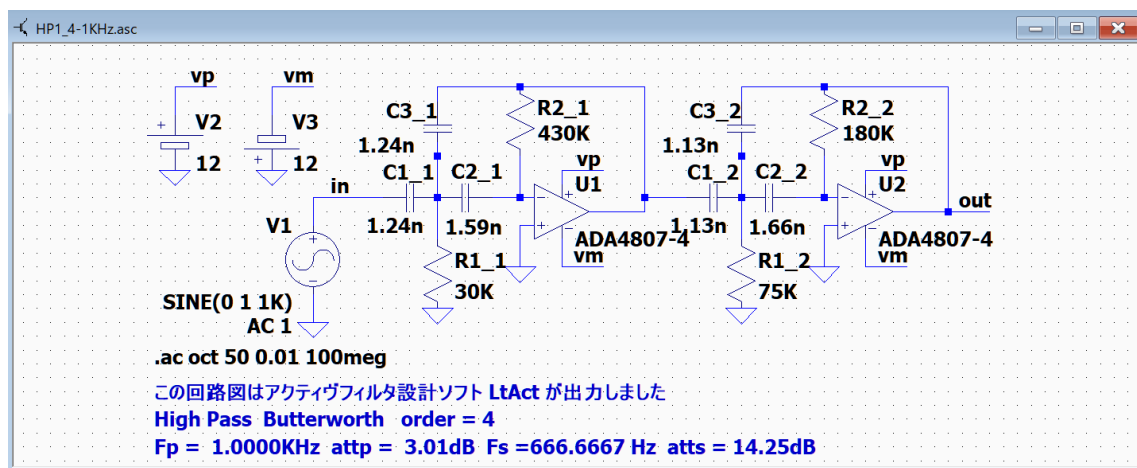
1 次のフィルタ hp1 の後に、2 次のフィルタ（HP1 または HP2）が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

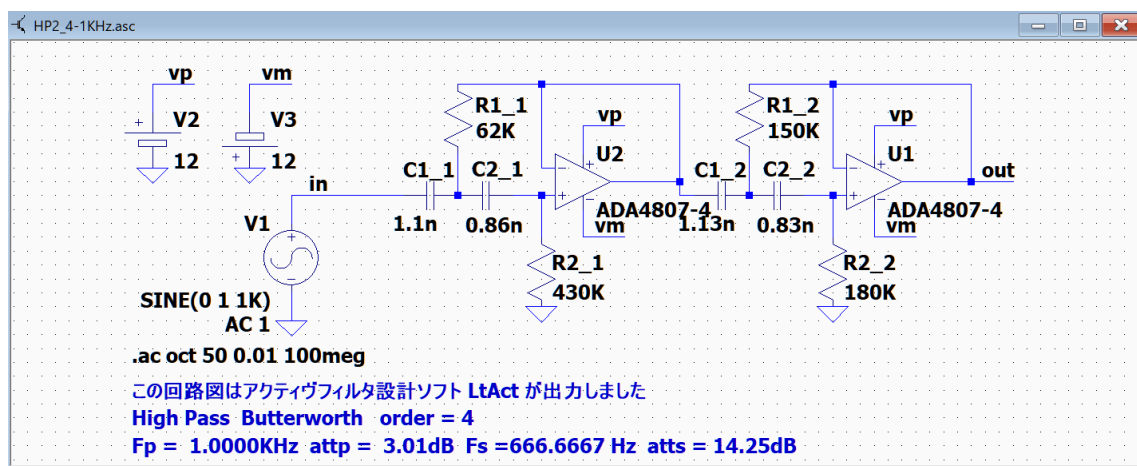
2 次のフィルタ（HP1 または HP2）が複数個使用されます。

次数が偶数の例

HP1 を使用する例



HP2 を使用する例



## 逆チェビシェフと楕円関数

逆チェビシェフと楕円関数のハイパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

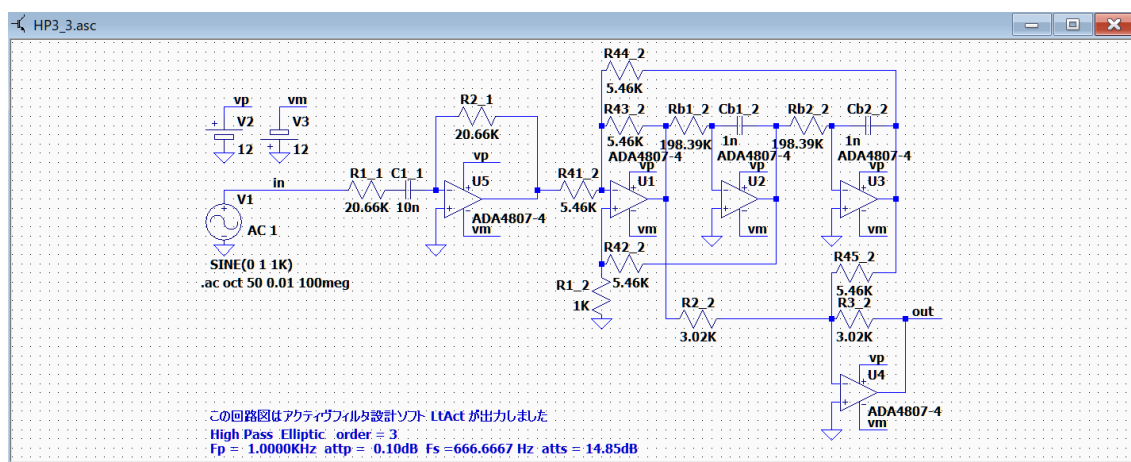
1 次のフィルタ hp1 の後に、2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

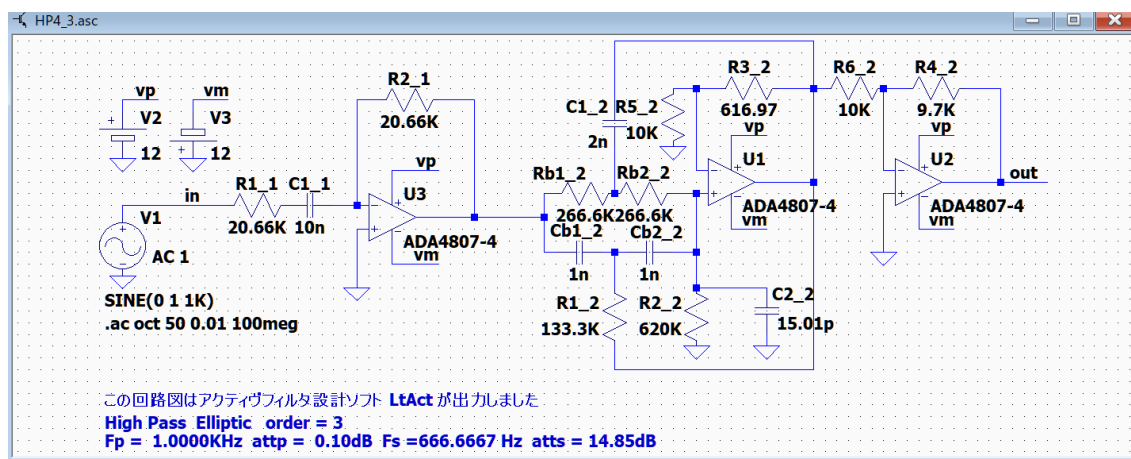
2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

次数が奇数の例

hp1 と et1 を使用する例



hp1 と et2 を使用する例



逆チェビシェフと楕円関数のハイパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

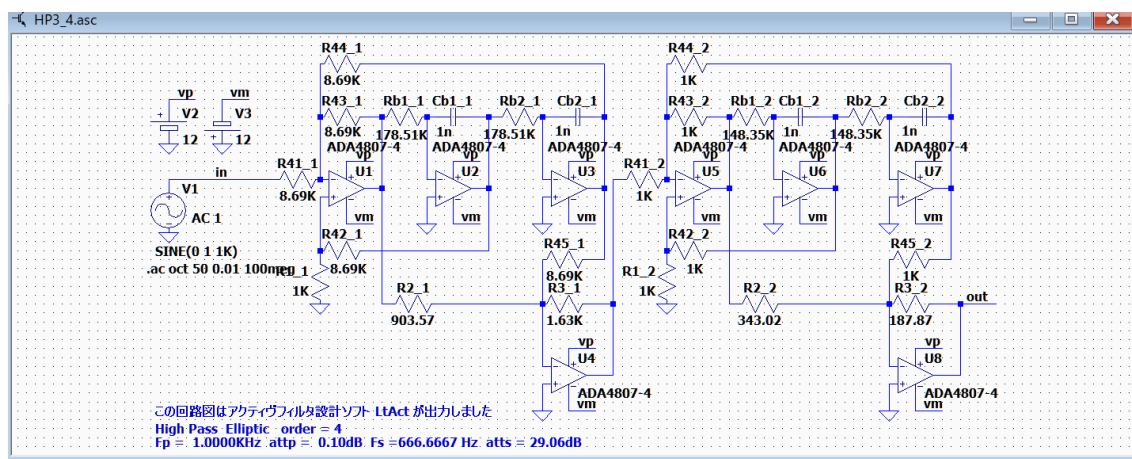
1 次のフィルタ hp1 の後に、2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

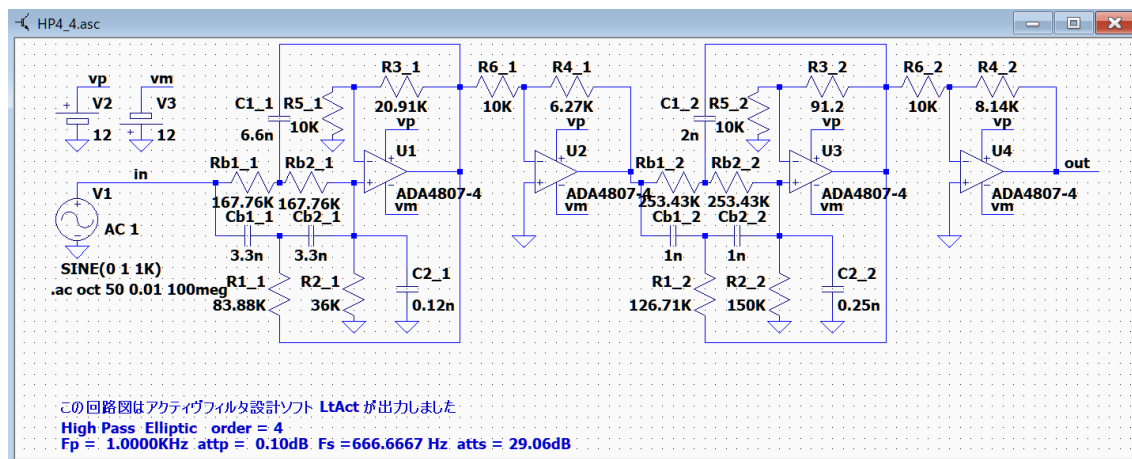
2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

次数が偶数の例

et1 を使用する例



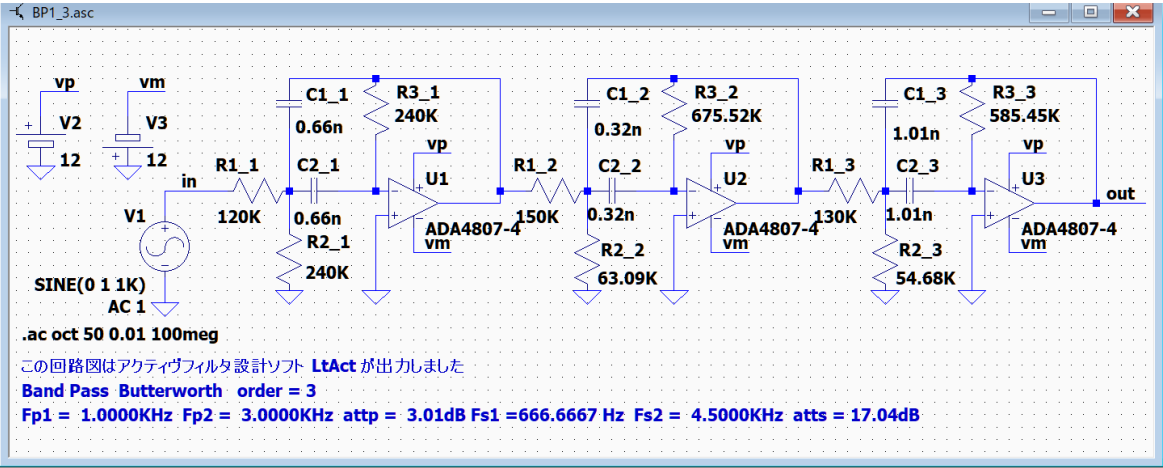
et2 を使用する例



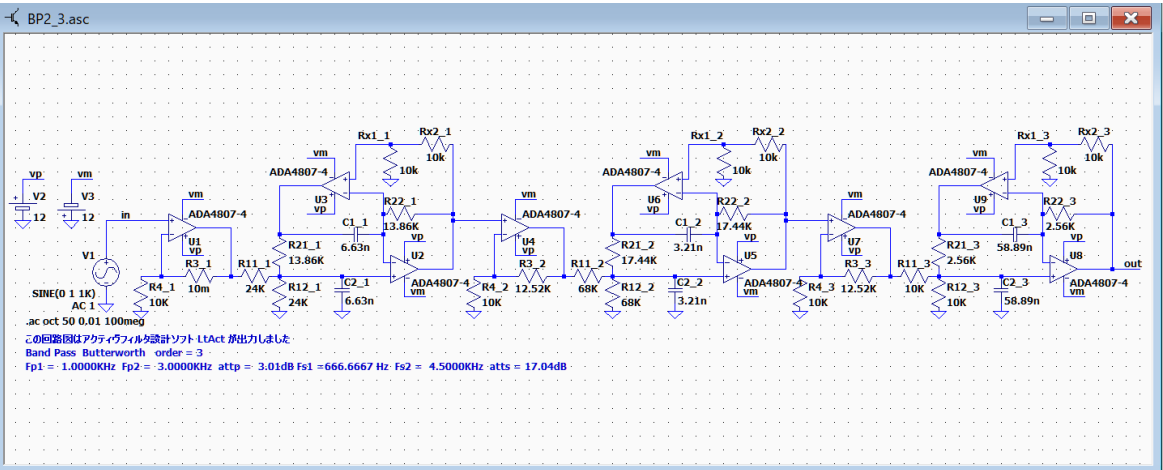
バンドパスフィルタ  
バターワースとチェビシェフ

バターワースとチェビシェフのバンドパスフィルタの構成は、  
フィルタの次数が奇数の場合は、  
1 次のバンドパスフィルタ（BP1 または BP2）が奇数個使用されます。  
フィルタの次数が偶数の場合は、  
2 次のバンドパスフィルタ（BP1 または BP2）が偶数個使用されます。

次数が奇数の例  
BP1 を使用する例



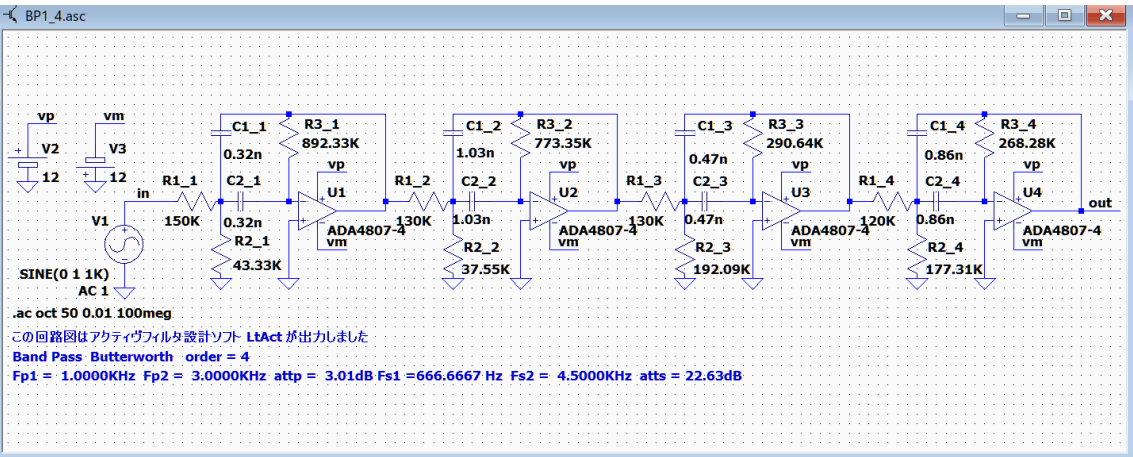
BP2 を使用する例



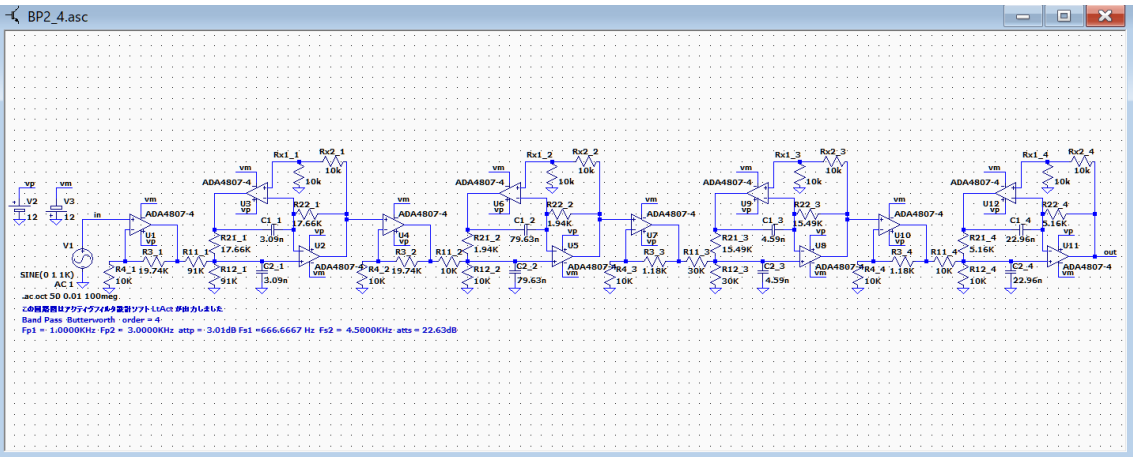
バターワースとチェビシェフのバンドパスフィルタの構成は、  
フィルタの次数が奇数の場合は、  
1 次のバンドパスフィルタ（BP1 または BP2）が奇数個使用されます。  
フィルタの次数が偶数の場合は、  
2 次のバンドパスフィルタ（BP1 または BP2）が偶数個使用されます。

次数が偶数の例

BP1 を使用する例



BP2 を使用する例



## 逆チェビシェフと楕円関数

逆チェビシェフと楕円関数のバンドパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

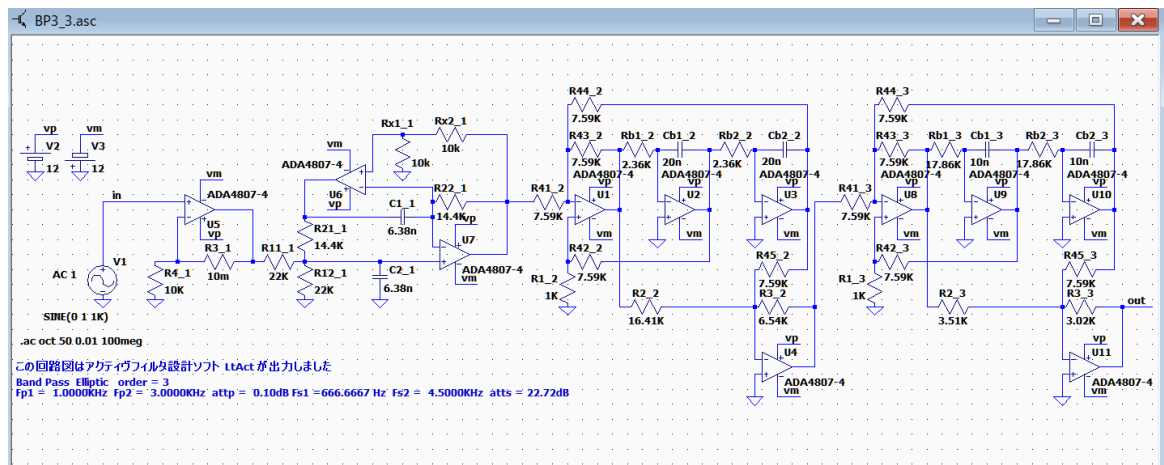
1 次のバンドパスフィルタ BP2 の後に、2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドパスフィルタ（et1 または et2）が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

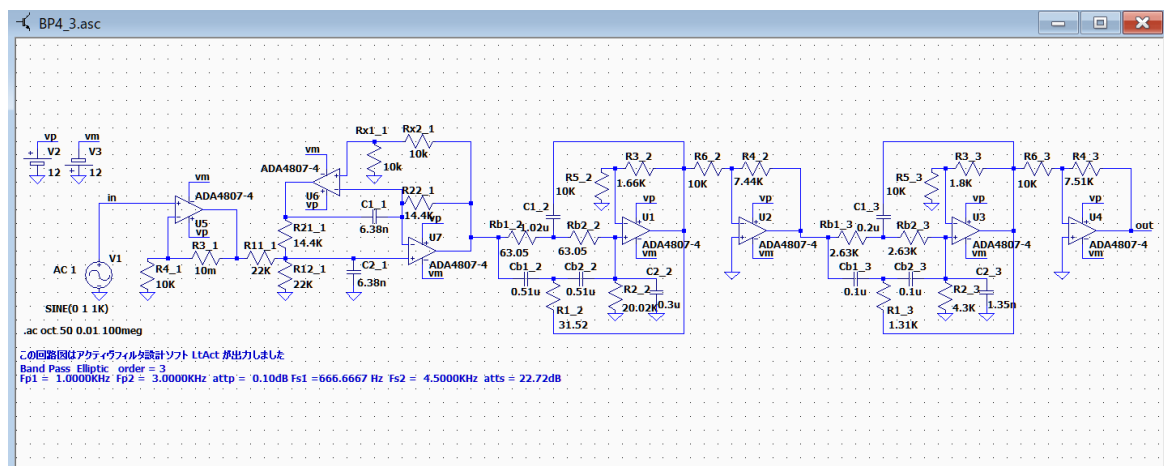
2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドパスフィルタ（et1 または et2）が複数使用されます。

次数が奇数の例

BP2 と et1 を使用する例



BP2 と et2 を使用する例



逆チェビシェフと楕円関数のバンドパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

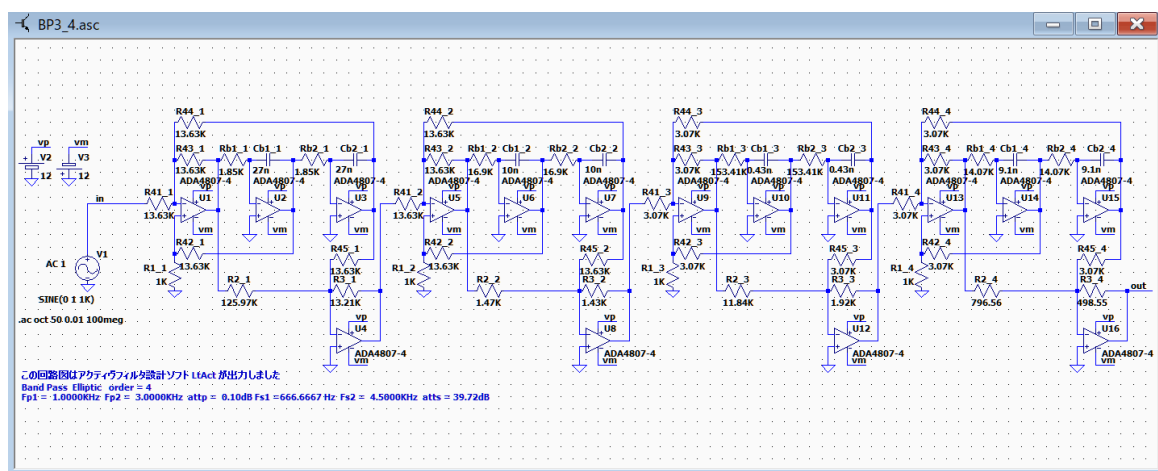
1 次のバンドパスフィルタ BP2 の後に、2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドパスフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

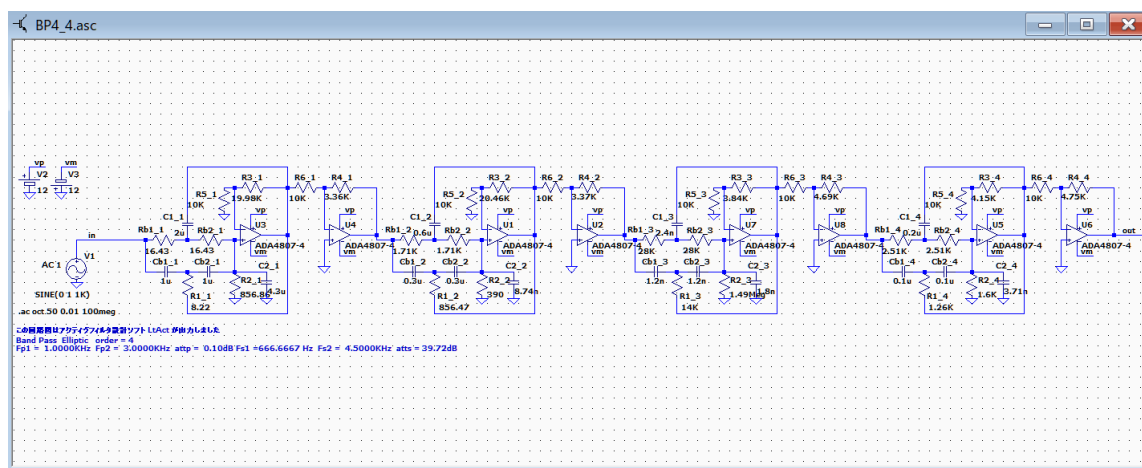
2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドパスフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

次数が偶数の例

et1 を使用する例



et2 を使用する例





## バンドエリミネーションフィルタ

### バターワース、チェビシェフ、逆チェビシェフおよび楕円関数

バンドエリミネーションフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

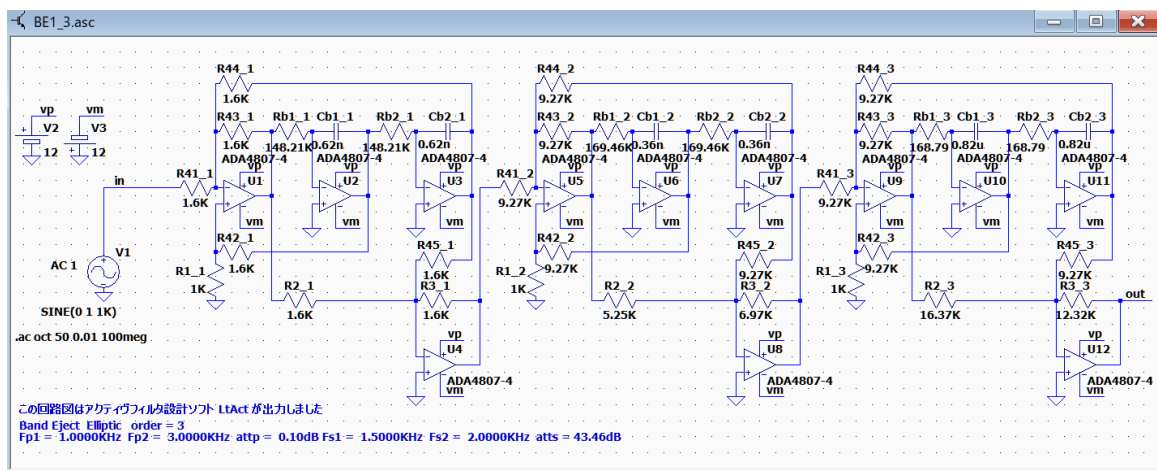
1 次のバンドエリミネーションフィルタ（et1 または et2）の後に、2 次のハイパスフィルタと 2 次のローパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ（et1 または et2）が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

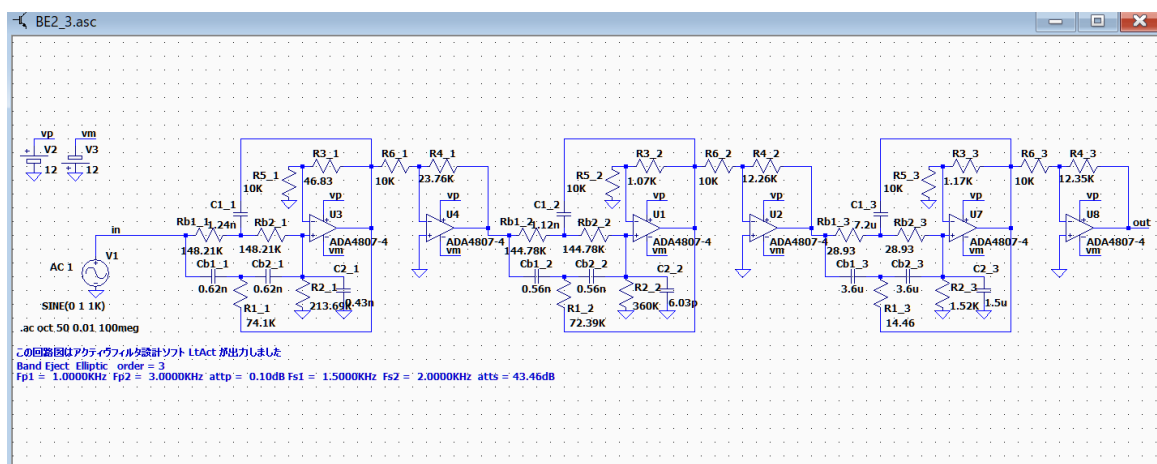
2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ（et1 または et2）が複数使用されます。

次数が奇数の例

et1 を使用する例



et2 を使用する例



バンドエリミネーションフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

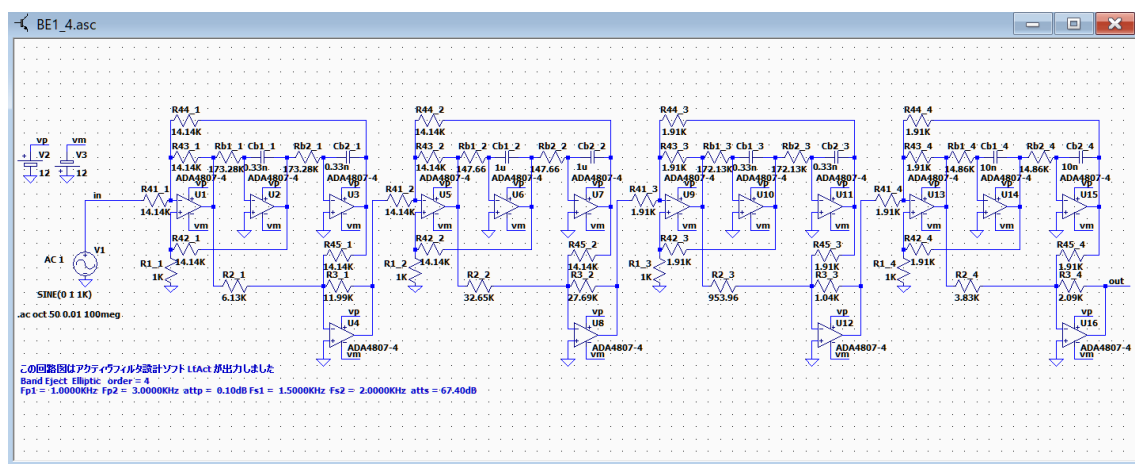
1 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) の後に、2 次のハイパスフィルタと 2 次のローパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

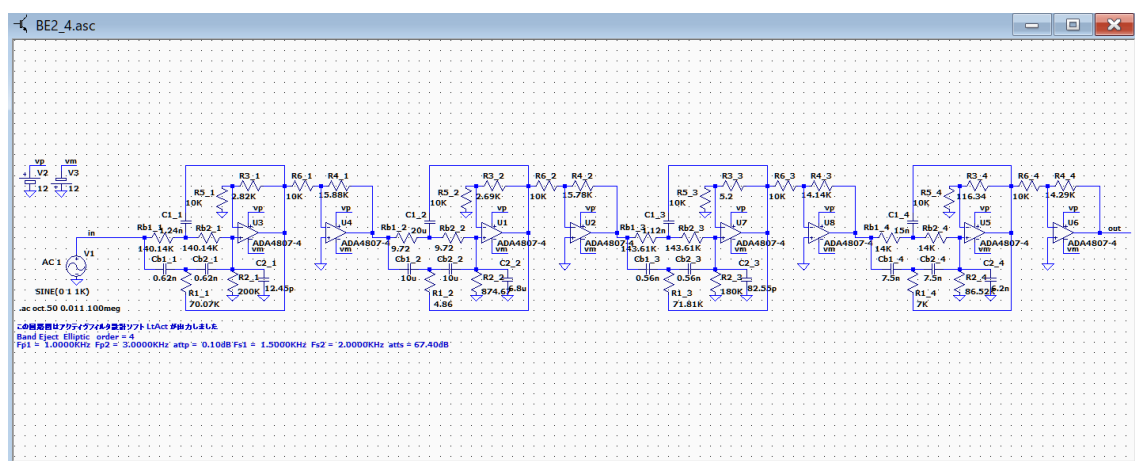
2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

次数が偶数の例

et1 を使用する例



et2 を使用する例



LtAct のダイアログの用語と入力方法について

公開中のソフト「LtAct」でフィルタのパラメータを入力するためには、カットオフ周波数とかリプルなどの用語を理解して入力する必要があります。

フィルターごとに使用される用語は次のようになります。

ローパスフィルタの場合

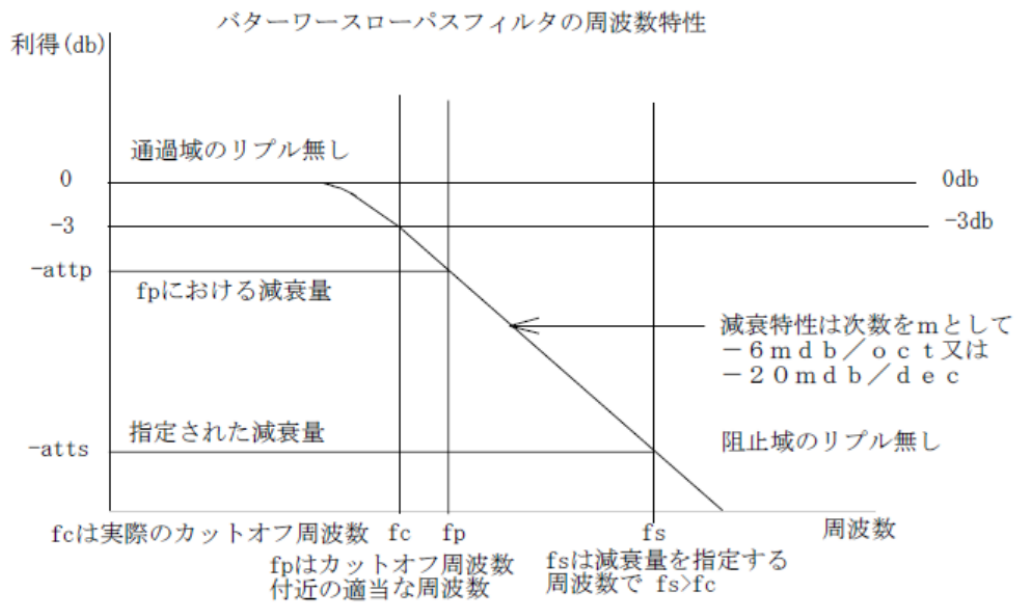
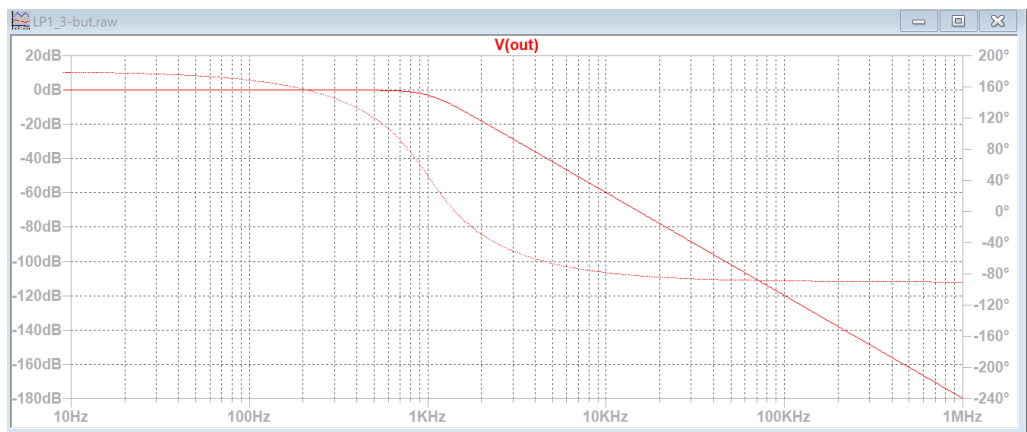


図 1 - 1 バターワースローパスフィルタの周波数特性

各種フィルタでは通過域の減衰量を 0dB として、減衰量が 3dB となる周波数をカットオフ周波数と呼びます。

-3dB というのは、信号の振幅が  $1/\sqrt{2}$ 、電力では  $1/2$  になることを意味します。

注意：バターワースフィルタではカットオフ周波数における減衰量は、フィルタの次数によらず -3dB となります。



## バターワースを設計する時

次数を入力しない時

「1 行目  $F_p$ 」にカットオフ周波数または減衰域の周波数  $F_p$  を入力する。

必要なら周波数の単位を変更する。

「2 行目  $att_p$ 」に上で入力した  $F_p$  における減衰量  $att_p$ (dB) を入力する。

バターワースではカットオフ周波数の減衰量  $att_p$  はあらかじめ 3.01dB に設定されていますが、 $att_p$  を 6 などに変更すると  $F_p$  は減衰域の周波数になります。

「3 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を指定する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_s / F_p$ ) を入力する。

「4 行目  $atts$ 」に周波数  $F_s$  における最低減衰量  $atts$  を入力する。

上記の入力後「OK」を押すと、周波数  $F_p$  の減衰量が  $att_p$  で、周波数  $F_s$  における減衰量が  $atts$  を越えるローパスフィルタが設計されて、その周波数特性が表示される。

次数を入力する時

「1 行目  $m$ 」にフィルタの次数  $m$  を入力する。

「2 行目  $F_c$ 」にカットオフ周波数  $F_c$  を入力する。

必要なら周波数の単位を変更する。

「3 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を確認する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_s / F_p$ ) を入力する。

上記の入力後「OK」を押すと、周波数  $F_p$  の減衰量が  $att_p$  となるローパスフィルタが設計されて、その周波数特性が表示される。

チェビシェフローパスフィルタの場合

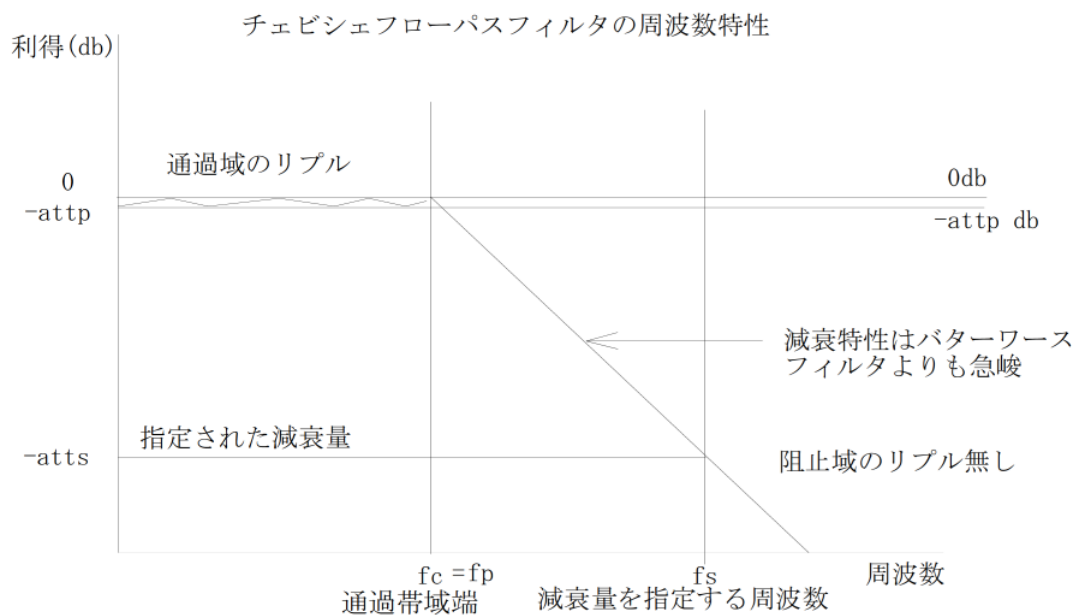


図 1－2 チェビシェフローパスフィルタの周波数特性

次数を入力しない時

設計パラメータの入力

フィルタの種類    ローパスフィルタ

遮断特性    Chebyshev

カットオフ周波数  $F_p$     1    KHz

周波数  $F_p$  における減衰量又はリプル  $attp$     0.1    dB

減衰量を指定する周波数を  $F_s$  として,  $X_s = F_s/F_p$     1.5    倍

周波数  $F_s$  における減衰量  $atts$     60    dB

OK

キャンセル

- 「1 行目  $F_p$ 」に通過域端の周波数  $F_p$  を入力する。
- 必要なら周波数の単位を変更する。
- 「2 行目  $attp$ 」に上で入力した  $F_p$  におけるリプル  $attp$ (dB) を入力する。
- 「3 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を指定する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_s/F_p$ ) を入力する。
- 「4 行目  $atts$ 」に周波数  $F_s$  における最低減衰量  $atts$  を入力する。

上記の入力後「OK」を押すと、周波数  $F_p$  のリプルが  $attp$  で、周波数  $F_s$  における減衰量が  $atts$  を越えるローパスフィルタが設計されて、その周波数特性が表示される。

次数を入力する時

設計パラメータの入力

フィルタの種類 ローパスフィルタ 遮断特性 チェビシェフ

設計するフィルタの次数  $m$  ( $m \leq 58$ ) 10

カットオフ周波数  $F_c$  1 KHz

周波数  $F_c$  における減衰量又はリプル  $att_p$  0.1 dB

最低減衰量に達する周波数を  $F_s$  として、 $X_s = F_s / F_c$  1.5 倍

OK Cancel

「1 行目  $m$ 」にフィルタの次数  $m$  を入力する。

「2 行目  $F_c$ 」にカットオフ周波数（通過域端の周波数） $F_c$  を入力する。

必要なら周波数の単位を変更する。

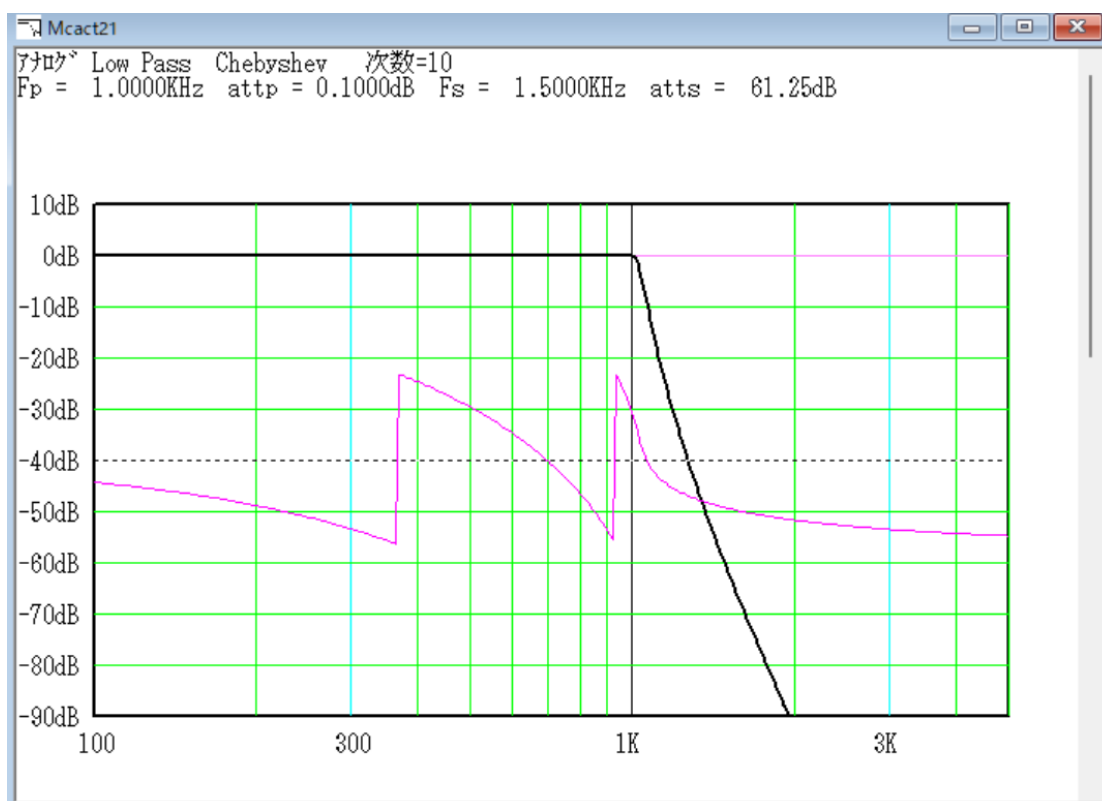
「3 行目  $att_p$ 」に周波数  $F_c$  におけるリプル  $att_p$  を入力する。

「4 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を確認する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_s / F_p$ ) を入力する。

上記のように希望するフィルタのパラメータを入力後「OK」を押すと、瞬時に設計が完了して設計されたローパスフィルタの周波数特性が表示されます。

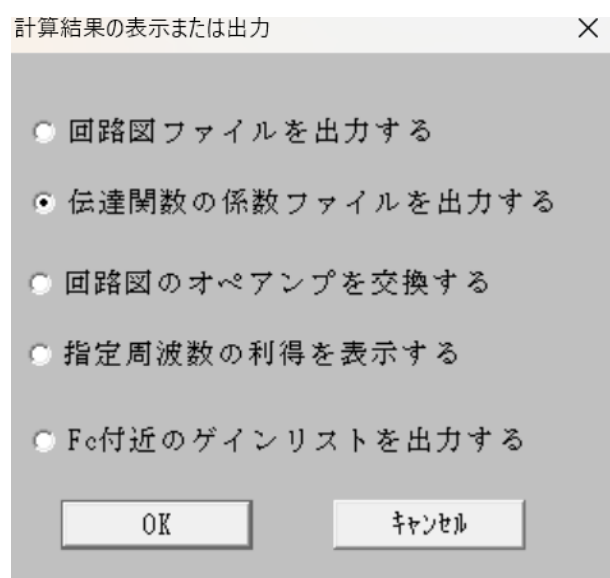
この時、同時に設計したフィルタの伝達関数も計算されています。

伝達関数の係数を知りたい時は、「表示・出力」からファイルを出力できます。

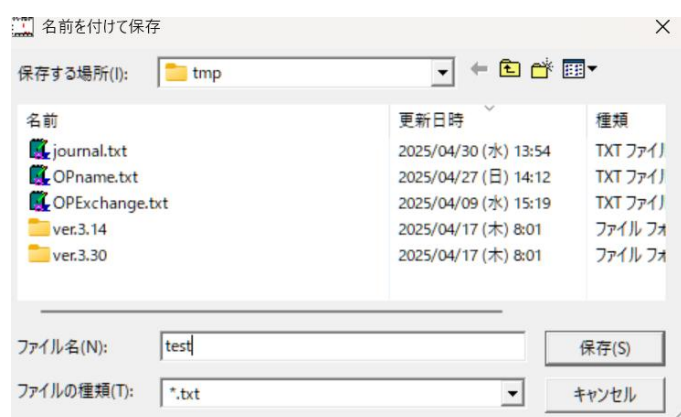


1KHz のゲインが 0.1dB で、1.5KHz のゲインは  $-61.25\text{dB}$  になることが分かります。

伝達関数の係数を出力するには、「表示・出力」をクリックします。



「伝達関数の係数ファイルを出力する」をクリックして「OK」を押します。



ファイルを保存するフォルダを選択して、ファイル名を入力して「保存」を押します。

保存した「test.txt」を開きます。

+++++++ 伝達関数の係数、カットオフ周波数、Q 値、GB 値 ++++++

アナログ Low Pass Chebyshev 次数=10

Fp = 1.0000KHz attp = 0.1000dB Fs = 1.5000KHz atts = 61.25dB

2 次式の形式

$$P_{n-2} \cdot s^2 + P_{n-3} \cdot s + P_{n-4}$$

Hn = -----

$$s^2 + P_{n-0} \cdot s + P_{n-1}$$

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	512.5656	41.1963Meg	0	0	41.1963Meg
	Fc= 1.0215KHz Fc ゲイン= 21.9536 dB Q = 12.5222 GB 積= 1.2792MegHz				
2	1.4875K	34.0256Meg	0	0	34.0256Meg
	Fc= 928.3739 Hz Fc ゲイン= 11.8688 dB Q = 3.9214 GB 積=364.0507KHz				
3	2.3169K	22.4232Meg	0	0	22.4232Meg
	Fc= 753.6481 Hz Fc ゲイン= 6.2089 dB Q = 2.0438 GB 積=154.0334KHz				
4	2.9194K	10.8207Meg	0	0	10.8207Meg
	Fc= 523.5386 Hz Fc ゲイン= 1.0366 dB Q = 1.1268 GB 積= 58.9901KHz				
5	3.2362K	3.6501Meg	0	0	3.6501Meg
	Fc= 304.0674 Hz Fc ゲイン= - 4.5777 dB Q = 0.5904 GB 積= 17.9507KHz				

このフィルターの伝達関数は 2 次のローパスフィルタが 5 個含まれています。

それぞれの伝達関数は  $H_n = \frac{P_{n-2} \cdot s^2 + P_{n-3} \cdot s + P_{n-4}}{s^2 + P_{n-0} \cdot s + P_{n-1}}$  の形式で表されます。

伝達関数の係数は 0 となるものを除いて、

1 番目の伝達関数では、 $P_{n-0} = 512.5656$ ,  $P_{n-1} = 41.1963 \text{ Meg}$ ,  $P_{n-4} = 41.1963 \text{ Meg}$

2 番目の伝達関数では、 $P_{n-0} = 1.4875 \text{ K}$ ,  $P_{n-1} = 34.0256 \text{ Meg}$ ,  $P_{n-4} = 34.0256 \text{ Meg}$

3 番目の伝達関数では、 $P_{n-0} = 2.3169 \text{ K}$ ,  $P_{n-1} = 22.4232 \text{ Meg}$ ,  $P_{n-4} = 22.4232 \text{ Meg}$

4 番目の伝達関数では、 $P_{n-0} = 2.9194 \text{ K}$ ,  $P_{n-1} = 10.8207 \text{ Meg}$ ,  $P_{n-4} = 10.8207 \text{ Meg}$

5 番目の伝達関数では、 $P_{n-0} = 3.2362 \text{ K}$ ,  $P_{n-1} = 3.6501 \text{ Meg}$ ,  $P_{n-4} = 3.6501 \text{ Meg}$

のようになることが分かります。



逆チェビシェフローパスフィルタの場合

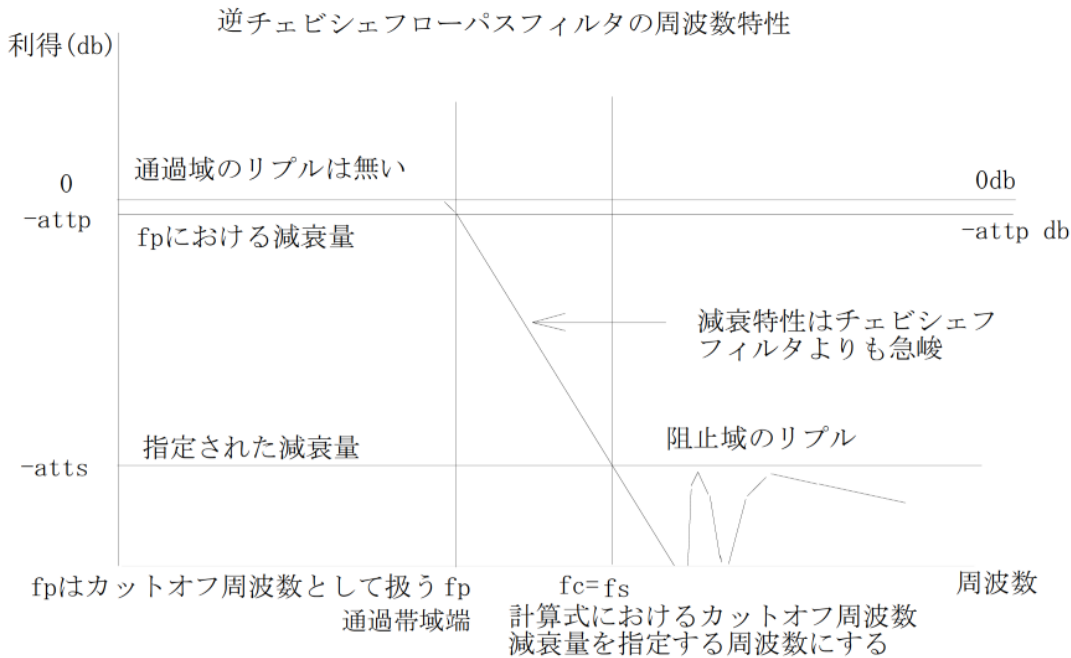


図 1－3 逆チェビシェフローパスフィルタの周波数特性

次数を入力しない時

設計パラメータの入力

フィルタの種類    ローパスフィルタ

遮断特性    Inv. Cheb

カットオフ周波数 Fp    1    KHz

周波数Fpにおける減衰量又はリプル attp    0.1    dB

減衰量を指定する周波数をFsとして、Xs = Fs/Fp    1.5    倍    OK

周波数Fsにおける減衰量 atts    60    dB    キャンセル

- 「1 行目 Fp」に通過域端の周波数 Fp を入力する。
- 必要なら周波数の単位を変更する。
- 「2 行目 attp」に上で入力した Fp における減衰量 attp(dB) を入力する。
- 「3 行目 Xs」に最低減衰量を指定する周波数 Fs と Fp の比 (Fs / Fp) を入力する。
- 「4 行目 atts」に周波数 Fs における最低減衰量 atts を入力する。

上記の入力後「OK」を押すと、周波数 Fp の減衰量が attp で、周波数 Fs における減衰量が atts を越えるローパスフィルタが設計されて、その周波数特性が表示される。

次数を入力する時

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Inv. Cheb
設計するフィルタの次数 $m(\leq 58)$	10		
カットオフ周波数 $F_c$	1	KHz	
周波数 $F_c$ における減衰量又はリプル $att_p$	0.1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を $F_s$ として、 $X_s = F_s/F_c$	1.5	倍	キャンセル

「1 行目  $m$ 」にフィルタの次数  $m$  を入力する。

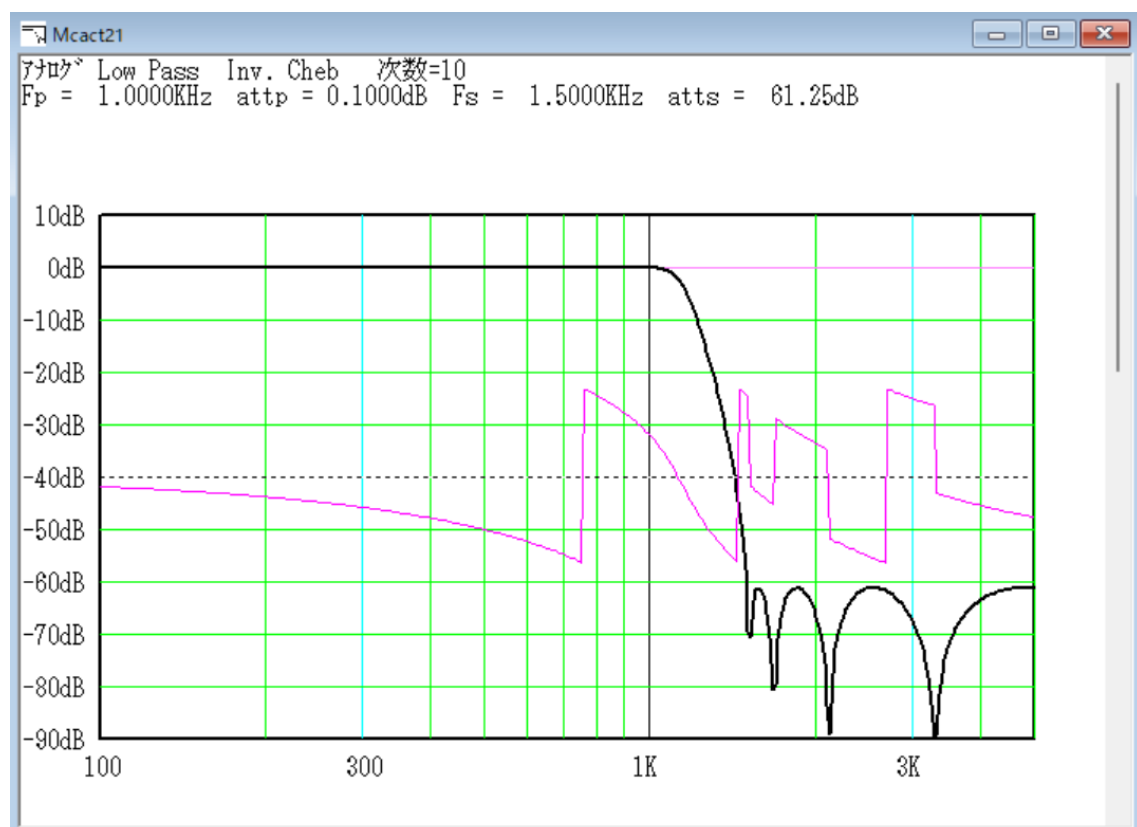
「2 行目  $F_c$ 」にカットオフ周波数（通過域端の周波数） $F_c$  を入力する。

必要なら周波数の単位を変更する。

「3 行目  $att_p$ 」に周波数  $F_c$  における減衰量  $att_p$  を入力する。

「4 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を確認する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_s / F_p$ ) を入力する。

上記の入力後「OK」を押すと、周波数  $F_c$  の減衰量が  $att_p$  となるローパスフィルタが設計されて、その周波数特性が表示される。



楕円関数ローパスフィルタの場合

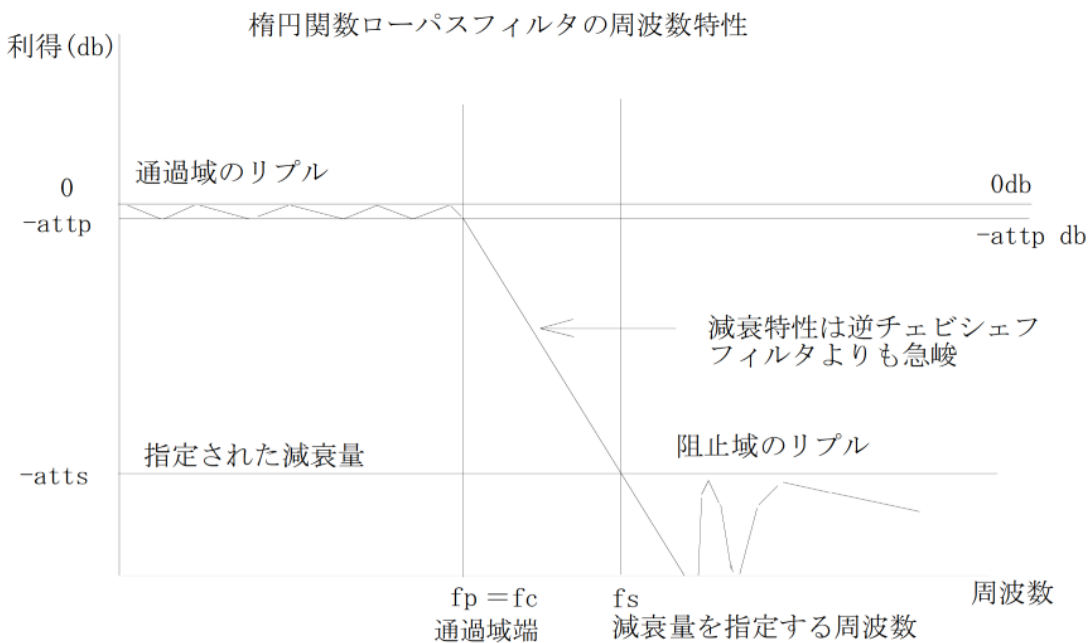


図 1－4 楕円関数ローパスフィルタの周波数特性

次数を入力しない時

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Elliptic
カットオフ周波数 $F_p$	<input type="text" value="1"/>		KHz
周波数 $F_p$ における減衰量又はリプル $att_p$	<input type="text" value="0.1"/>		dB
減衰量を指定する周波数を $F_s$ として、 $X_s = F_s / F_p$	<input type="text" value="1.5"/>		倍
周波数 $F_s$ における減衰量 $atts$	<input type="text" value="60"/>		dB

OKキャンセル

- 「1 行目  $F_p$ 」に通過域端の周波数  $F_p$  を入力する。
- 必要なら周波数の単位を変更する。
- 「2 行目  $att_p$ 」に上で入力した  $F_p$  における減衰量  $att_p$ (dB) を入力する。
- 「3 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を指定する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_s / F_p$ ) を入力する。
- 「4 行目  $atts$ 」に周波数  $F_s$  における最低減衰量  $atts$  を入力する。
- 上記の入力後「OK」を押すと、周波数  $F_p$  の減衰量が  $att_p$  で、周波数  $F_s$  における減衰量が  $atts$  を越えるローパスフィルタが設計されて、その周波数特性が表示される。

次数を入力する時

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Elliptic
設計するフィルタの次数 $m(<=58)$	7		
カットオフ周波数 $F_c$	1	KHz	
周波数 $F_c$ における減衰量又はリップル $att_p$	0.1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を $F_s$ として、 $X_s = F_s/F_c$	1.5	倍	キャンセル

「1 行目  $m$ 」にフィルタの次数  $m$  を入力する。

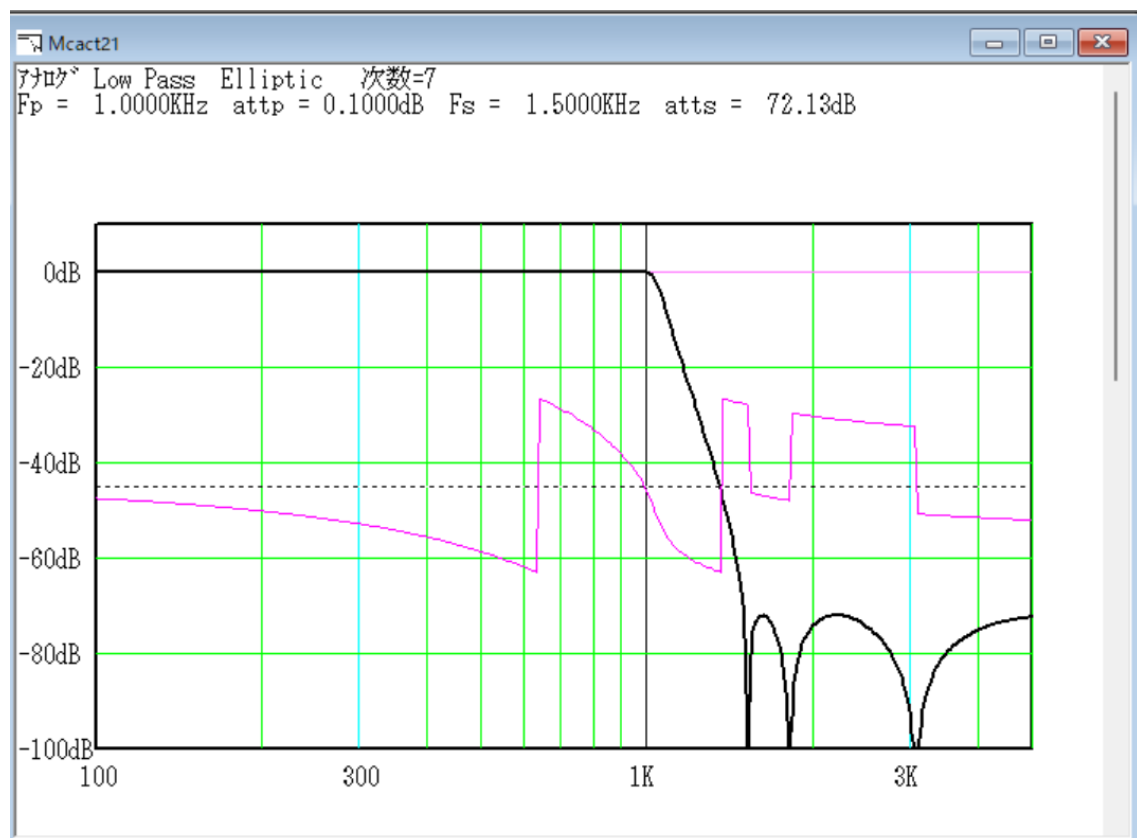
「2 行目  $F_c$ 」にカットオフ周波数（通過域端の周波数） $F_c$  を入力する。

必要なら周波数の単位を変更する。

「3 行目  $att_p$ 」に周波数  $F_c$  における減衰量  $att_p$  を入力する。

「4 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を確認する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_s/F_p$ ) を入力する。

上記の入力後「OK」を押すと、周波数  $F_c$  の減衰量が  $att_p$  となるローパスフィルタが設計されて、その周波数特性が表示される。



ハイパスフィルタ

ハイパスフィルタはローパスフィルタの場合と周波数の上下が反対になるだけです。  
バターワース・ハイパスフィルタの例を示します。

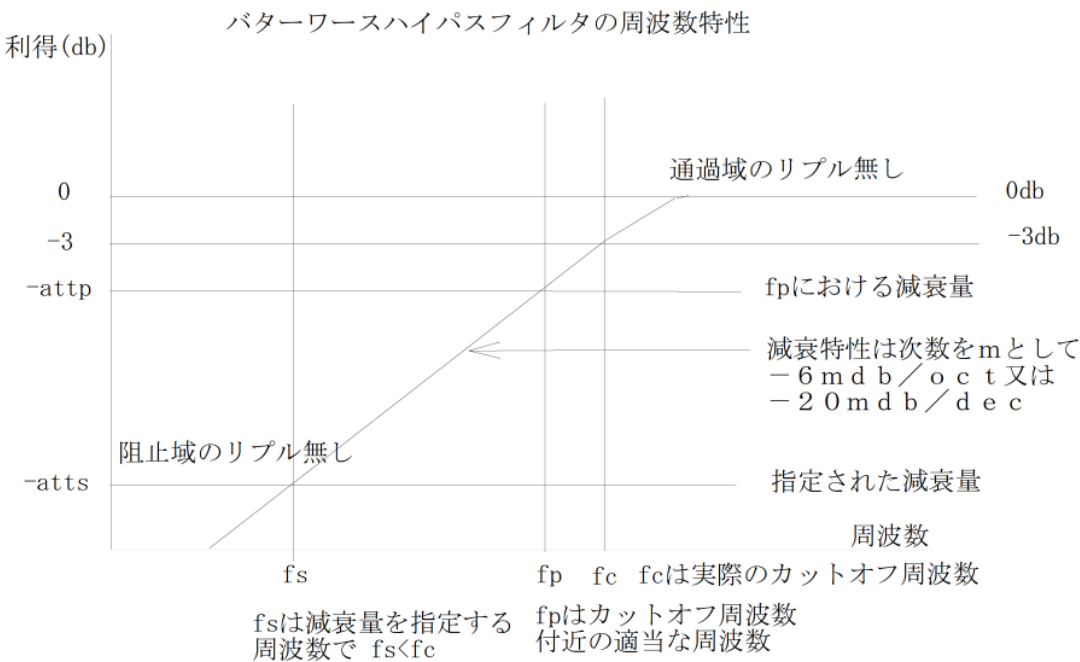
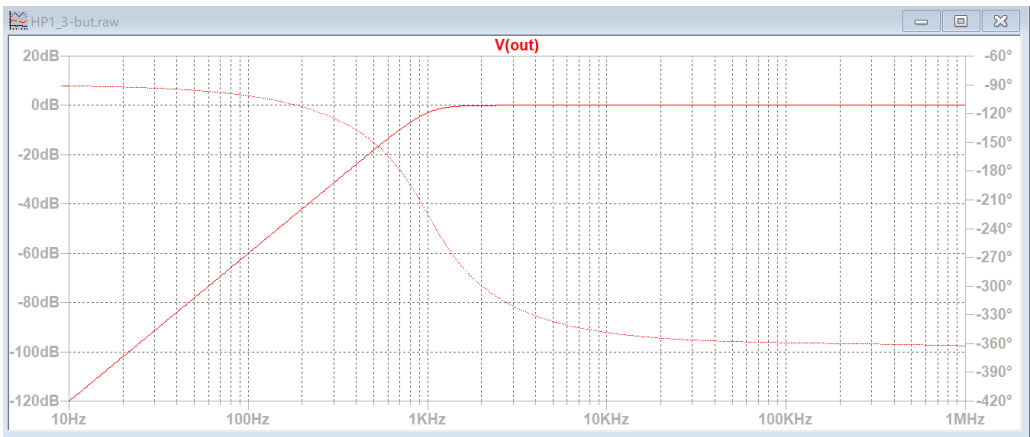


図 3 - 1 バターワースハイパスフィルタの周波数特性

ハイパスフィルタの場合には、 $F_c$  はカットオフ周波数で、 $F_p$  はカットオフ周波数付近の周波数、 $F_s$  は最低減衰量を指定する周波数、 $X_s$  は  $F_c$  ( $F_p$ ) が  $F_s$  の何倍なのかを示す倍率を表します。 $X_s$  の許容範囲は  $1 < X_s \leq 100$  です。



バターワースフィルタを設計する時

次数を入力しない時

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ハイパスフィルタ	遮断特性	バターワース
カットオフ付近で減衰域の周波数 $F_p$	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="3.0102999566398"/>	<input type="text" value="dB"/>
周波数 $F_p$ における減衰量又はリプル $att_p$	<input type="text" value="1.5"/>	<input type="text" value="60"/>	<input type="text" value="dB"/>
減衰量を指定する周波数を $F_s$ として, $X_s = F_p/F_s$	<input type="text" value="1.5"/>	<input type="text" value="60"/>	<input type="text" value="dB"/>
周波数 $F_s$ における減衰量 $atts$	<input type="text" value="1.5"/>	<input type="text" value="60"/>	<input type="text" value="dB"/>

OK キャンセル

- 「1 行目  $F_p$ 」にカットオフ周波数または減衰域の周波数  $F_p$  を入力する。
- 「2 行目  $att_p$ 」に上で入力した  $F_p$  における減衰量  $att_p(\text{dB})$  を入力する。
- $F_p$  をカットオフ周波数にする場合は既に設定されているので、入力は不要。
- 「3 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を指定する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_p/F_s$ ) を入力する。
- 「4 行目  $atts$ 」に周波数  $F_s$  における最低減衰量  $atts$  を入力する。

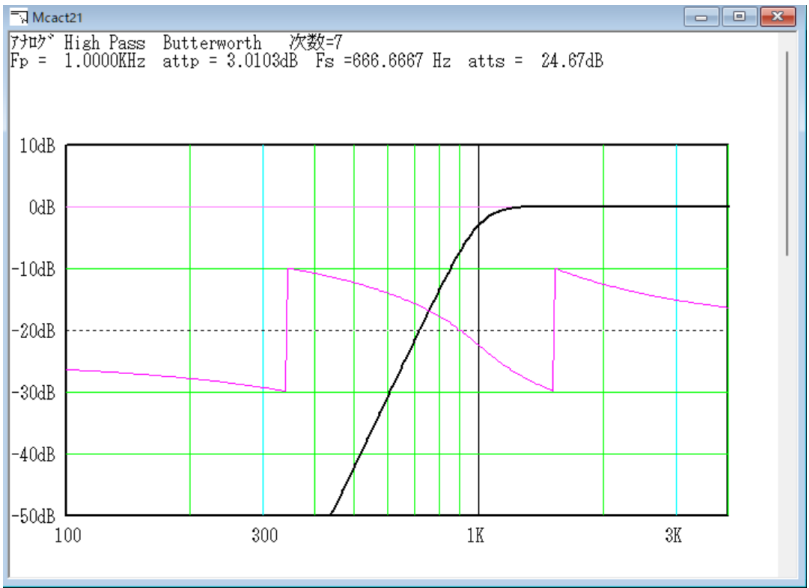
次数を入力する時

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ハイパスフィルタ	遮断特性	バターワース
設計するフィルタの次数 $m(≤58)$	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1.5"/>	<input type="text" value="dB"/>
カットオフ周波数 $F_c$	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1.5"/>	<input type="text" value="dB"/>
最低減衰量に達する周波数を $F_s$ として, $X_s = F_c/F_s$	<input type="text" value="1.5"/>	<input type="text" value="1.5"/>	<input type="text" value="dB"/>

OK キャンセル

- 「1 行目  $m$ 」にフィルタの次数  $m$  を入力する。
- 「2 行目  $F_c$ 」にカットオフ周波数  $F_c$  を入力する。
- 「3 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を確認する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_p/F_s$ ) を入力する。



チェビシェフフィルタを設計する時

次数を入力しない時

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ハイパスフィルタ	遮断特性	Chebyshev
カットオフ周波数 $F_p$	1	KHz	
周波数 $F_p$ における減衰量又はリップル $att_p$	0.1	dB	
減衰量を指定する周波数を $F_s$ として, $X_s = F_p / F_s$	1.5	倍	
周波数 $F_s$ における減衰量 $atts$	60	dB	

OK キャンセル

- 「1 行目  $F_p$ 」に通過域端の周波数  $F_p$  を入力する。
- 「2 行目  $att_p$ 」に上で入力した  $F_p$  におけるリップル  $att_p$ (dB) を入力する。
- 「3 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を指定する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_p / F_s$ ) を入力する。
- 「4 行目  $atts$ 」に周波数  $F_s$  における最低減衰量  $atts$  を入力する。

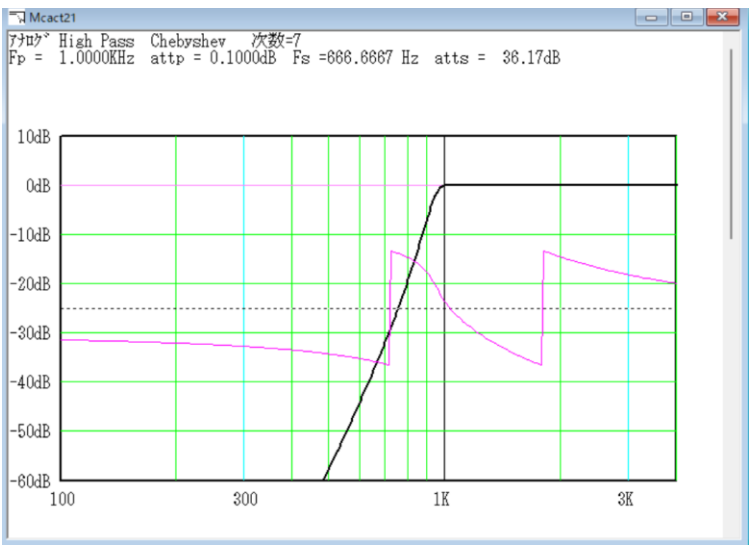
次数を入力する時

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ハイパスフィルタ	遮断特性	チェビシェフ
設計するフィルタの次数 $m$ ( $m \leq 58$ )	7		
カットオフ周波数 $F_c$	1	KHz	
周波数 $F_c$ における減衰量又はリップル $att_p$	0.1	dB	
最低減衰量に達する周波数を $F_s$ として, $X_s =$	1.5	倍	

OK キャンセル

- 「1 行目  $m$ 」にフィルタの次数  $m$  を入力する。
- 「2 行目  $F_c$ 」にカットオフ周波数 (通過域端の周波数)  $F_c$  を入力する。
- 「3 行目  $att_p$ 」に周波数  $F_c$  におけるリップル  $att_p$  を入力する。
- 「4 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を確認する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_p / F_s$ ) を入力する。



逆チェビシェフフィルタを設計する時

次数を入力しない時

設計パラメータの入力

フィルタの種類 ハイパスフィルタ

遮断特性 Inv. Cheb

カットオフ周波数  $F_p$

1

KHz

周波数 $F_p$ における減衰量又はリプル  $att_p$

0.1

dB

減衰量を指定する周波数を $F_s$ として、 $X_s = F_p/F_s$

1.5

倍

周波数 $F_s$ における減衰量  $atts$

60

dB

OK

キャンセル

- 「1 行目  $F_p$ 」に通過域端の周波数  $F_p$  を入力する。
- 「2 行目  $att_p$ 」に上で入力した  $F_p$  における減衰量  $att_p(\text{dB})$  を入力する。
- 「3 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を指定する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_p / F_s$ ) を入力する。
- 「4 行目  $atts$ 」に周波数  $F_s$  における最低減衰量  $atts$  を入力する。

次数を入力する時

設計パラメータの入力

フィルタの種類 ハイパスフィルタ

遮断特性 Inv. Cheb

設計するフィルタの次数  $m(<=58)$

10

カットオフ周波数  $F_c$

1

KHz

周波数 $F_c$ における減衰量又はリプル  $att_p$

0.1

dB

最低減衰量に達する周波数を $F_s$ として、 $X_s = F_c/F_s$

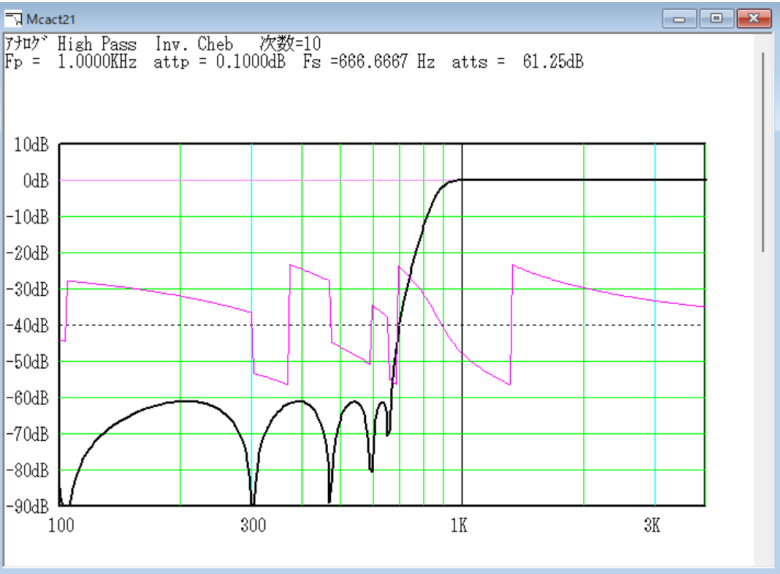
1.5

倍

OK

キャンセル

- 「1 行目  $m$ 」にフィルタの次数  $m$  を入力する。
- 「2 行目  $F_c$ 」にカットオフ周波数 (通過域端の周波数)  $F_c$  を入力する。
- 「3 行目  $att_p$ 」に周波数  $F_c$  における減衰量  $att_p$  を入力する。
- 「4 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を確認する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_p / F_s$ ) を入力する。





## 楕円関数フィルタを設計する時

次数を入力しない時

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ハイパスフィルタ	遮断特性	Elliptic
カットオフ周波数 $F_p$	1	KHz	
周波数 $F_p$ における減衰量又はリップル $att_p$	0.1	dB	
減衰量を指定する周波数を $F_s$ として, $X_s = F_p/F_s$	1.5	倍	OK
周波数 $F_s$ における減衰量 $atts$	60	dB	キャンセル

「1 行目  $F_p$ 」に通過域端の周波数  $F_p$  を入力する。

「2 行目  $att_p$ 」に上で入力した  $F_p$  における減衰量  $att_p$ (dB) を入力する。

「3 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を指定する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_p/F_s$ ) を入力する。

「4 行目  $atts$ 」に周波数  $F_s$  における最低減衰量  $atts$  を入力する。

次数を入力する時

設計パラメータの入力

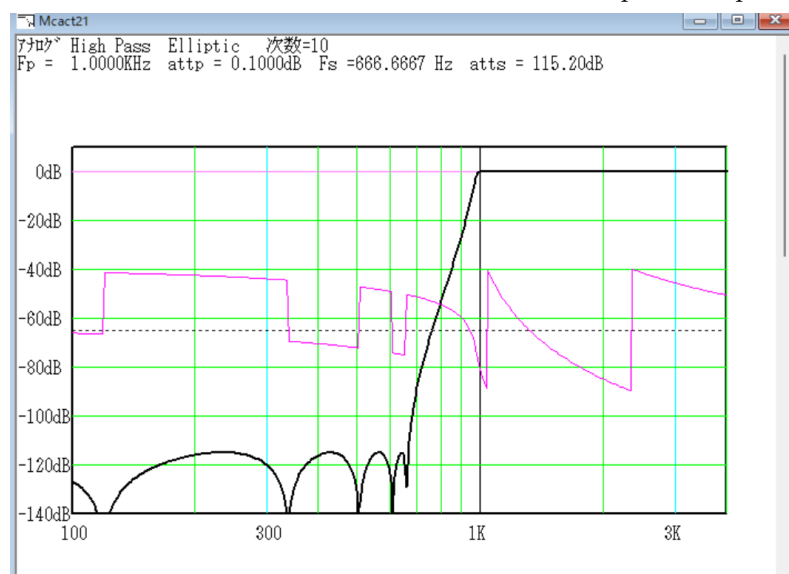
フィルタの種類	ハイパスフィルタ	遮断特性	Elliptic
設計するフィルタの次数 $m$ ( $m \leq 50$ )	10		
カットオフ周波数 $F_c$	1	KHz	
周波数 $F_c$ における減衰量又はリップル $att_p$	0.1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を $F_s$ として, $X_s = F_c/F_s$	1.5	倍	キャンセル

「1 行目  $m$ 」にフィルタの次数  $m$  を入力する。

「2 行目  $F_c$ 」にカットオフ周波数 (通過域端の周波数)  $F_c$  を入力する。

「3 行目  $att_p$ 」に周波数  $F_c$  における減衰量  $att_p$  を入力する。

「4 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を確認する周波数  $F_s$  と  $F_p$  の比 ( $F_p/F_s$ ) を入力する。



## バンドパスフィルタ

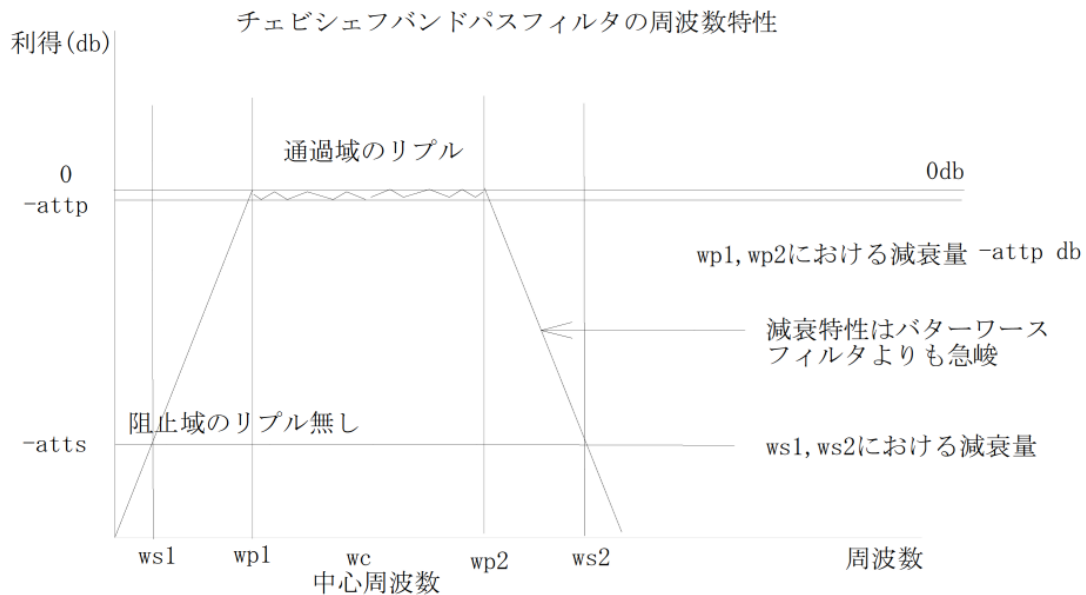


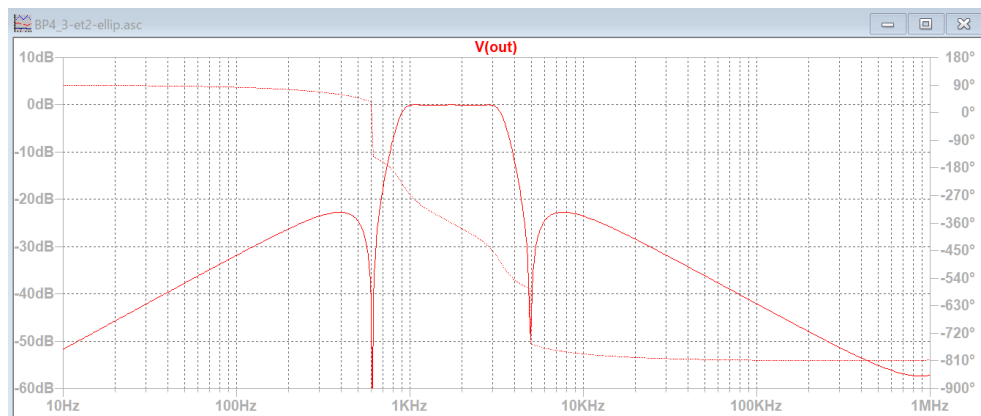
図 5 - 2 チェビシェフバンドパスフィルタの周波数特性

バンドパスフィルタでは通過域の周波数が、通過域下端  $F_{p1}$  と通過域上端  $F_{p2}$  の 2 つになります。

最低減衰量を指定する周波数も  $F_{s1}$  と  $F_{s2}$  の 2 つになりますが、指定するのは  $F_{s1}$  が  $F_{p1}$  の何分の 1 なのかを表す倍率  $X_s$  になります。 $X_s$  の許容範囲は  $1 < X_s \leq 100$  です。

従って、 $F_{s1} = F_{p1} / X_s$ 、 $F_{s2} = F_{p2} \cdot X_s$  の関係になります。

リプルは  $F_{p1}$  における減衰量または通過域・阻止域におけるリプルの振幅を表します。



バターワースフィルタを設計する時

次数を入力しない時

設計パラメータの入力

フィルタの種類 バンドパスフィルタ

遮断特性 バターワース

通過帯域 下端の周波数  $F_{p1} : (F_{s1} = F_{p1}/X_s)$  1 KHz

通過帯域 上端の周波数  $F_{p2} : (F_{s2} = F_{p2} \times X_s)$  3 KHz

周波数 $F_{p1}, F_{p2}$ における減衰量は 3.01dB とします

減衰量を指定する周波数を $F_{s1}$ として,  $X_s = F_{p1}/F_{s1}$  1.5 倍 OK

周波数 $F_{s1}, F_{s2}$ における減衰量 atts 60 dB キャンセル

- 「1 行目  $F_{p1}$ 」に通過域の下端周波数  $F_{p1}$  を入力する。
- 「2 行目  $F_{p2}$ 」に通過域の上端周波数  $F_{p2}$  を入力する。
- バターワースの場合、 $F_{p1}$  と  $F_{p2}$  における減衰量は 3.01dB となります。
- 「3 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を指定する周波数  $F_{s1}$  と  $F_{p1}$  の比 ( $F_{p1}/F_{s1}$ ) を入力する。
- 「4 行目 atts」に周波数  $F_{s1}$  における最低減衰量 atts を入力する。

次数を入力する時

設計パラメータの入力

フィルタの種類 バンドパスフィルタ

遮断特性 バターワース

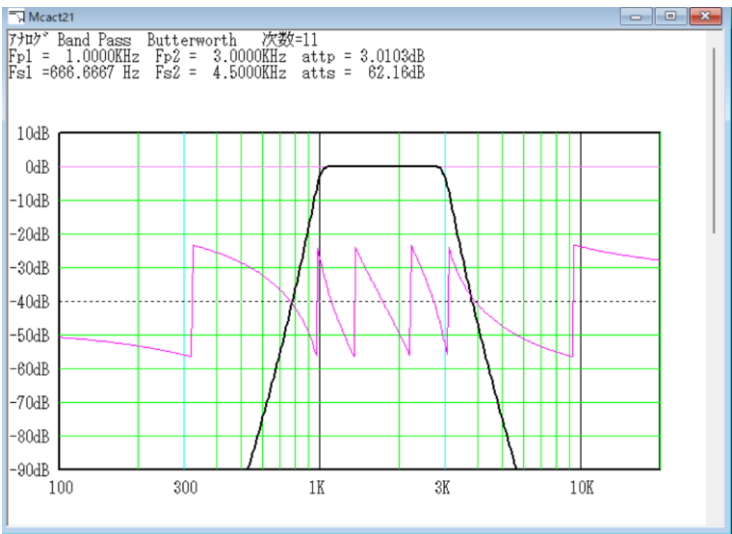
設計するフィルタの次数  $m (<= 50)$  11

通過帯域 下端の周波数  $F_{p1} : (F_{s1} = F_{p1}/X_s)$  1 KHz OK

通過帯域 上端の周波数  $F_{p2} : (F_{s2} = F_{p2} \times X_s)$  3 KHz キャンセル

最低減衰量に達する周波数を $F_{s1}$ として,  $X_s = F_{p1}/F_{s1}$  1.5 倍

- 「1 行目  $m$ 」にフィルタの次数  $m$  を入力する。
- 「2 行目  $F_{p1}$ 」に通過域の下端周波数  $F_{p1}$  を入力する。
- 「3 行目  $F_{p2}$ 」に通過域の上端周波数  $F_{p2}$  を入力する。
- $F_{p1}$  と  $F_{p2}$  における減衰量は 3.01dB となります。
- 「4 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を指定する周波数  $F_{s1}$  と  $F_{p1}$  の比 ( $F_{p1}/F_{s1}$ ) を入力する。



## チェビシェフ、逆チェビシェフ、楕円関数を設計する時

次数を入力しない時

設計パラメータの入力

フィルタの種類 バンドパスフィルタ

遮断特性 Chebyshev

通過帯域 下端の周波数  $F_{p1}$  : ( $F_{s1} = F_{p1}/X_s$ ) 1 KHz

通過帯域 上端の周波数  $F_{p2}$  : ( $F_{s2} = F_{p2} \cdot X_s$ ) 3 KHz

周波数  $F_{p1}, F_{p2}$  における減衰量又はリプル attp 0.1 dB

減衰量を指定する周波数を  $F_{s1}$  として,  $X_s = F_{p1}/F_{s1}$  1.5 倍

周波数  $F_{s1}, F_{s2}$  における減衰量 atts 60 dB

OK キャンセル

「1 行目  $F_{p1}$ 」に通過域の下端周波数  $F_{p1}$  を入力する。

「2 行目  $F_{p2}$ 」に通過域の上端周波数  $F_{p2}$  を入力する。

「3 行目 attp」に周波数  $F_{p1}$  のリプルを入力する。

「4 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を指定する周波数  $F_{s1}$  と  $F_{p1}$  の比 ( $F_{p1}/F_{s1}$ ) を入力する。

「5 行目 atts」に周波数  $F_{s1}$  における最低減衰量 atts を入力する。

次数を入力する時

設計パラメータの入力

フィルタの種類 バンドパスフィルタ

遮断特性 チェビシェフ

設計するフィルタの次数  $m$  ( $\leq 58$ ) 18

通過帯域 下端の周波数  $F_{p1}$  : ( $F_{s1} = F_{p1}/X_s$ ) 1 KHz

通過帯域 上端の周波数  $F_{p2}$  : ( $F_{s2} = F_{p2} \cdot X_s$ ) 3 KHz

周波数  $F_{p1}, F_{p2}$  における減衰量又はリプル attp 0.1 dB

最低減衰量に達する周波数を  $F_{s1}$  として,  $X_s = F_{p1}/F_{s1}$  1.5 倍

OK キャンセル

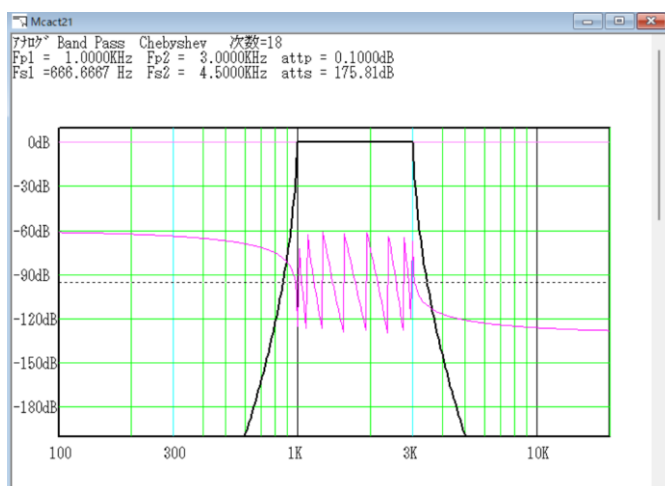
「1 行目  $m$ 」にフィルタの次数  $m$  を入力する。

「2 行目  $F_{p1}$ 」に通過域の下端周波数  $F_{p1}$  を入力する。

「3 行目  $F_{p2}$ 」に通過域の上端周波数  $F_{p2}$  を入力する。

「4 行目 attp」に周波数  $F_{p1}$  のリプルを入力する。

「5 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を指定する周波数  $F_{s1}$  と  $F_{p1}$  の比 ( $F_{p1}/F_{s1}$ ) を入力する。



バンドエリミネーションフィルタ

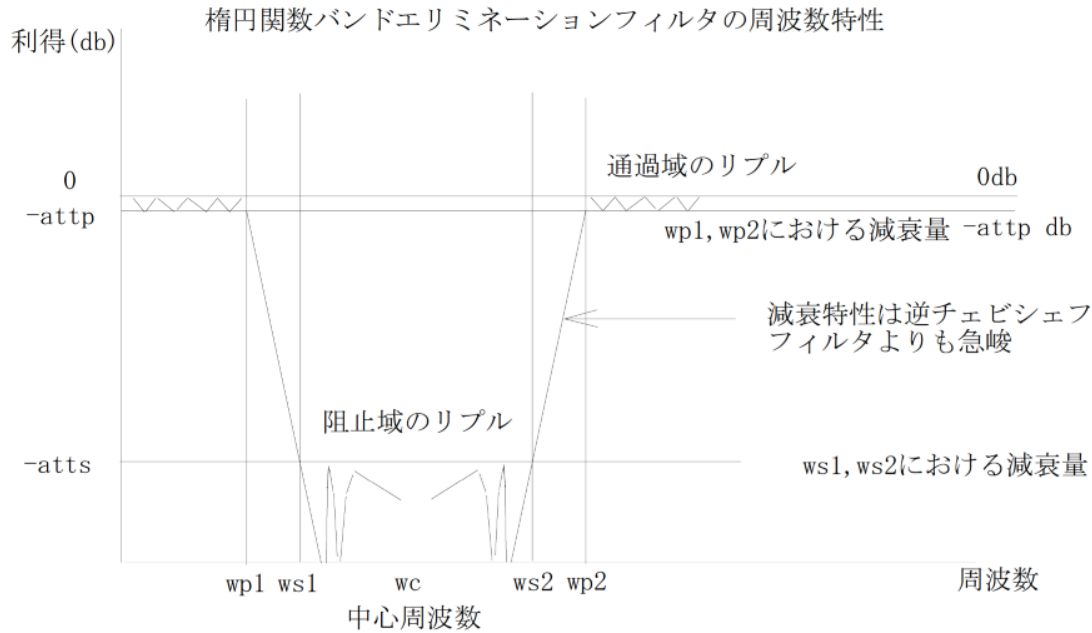
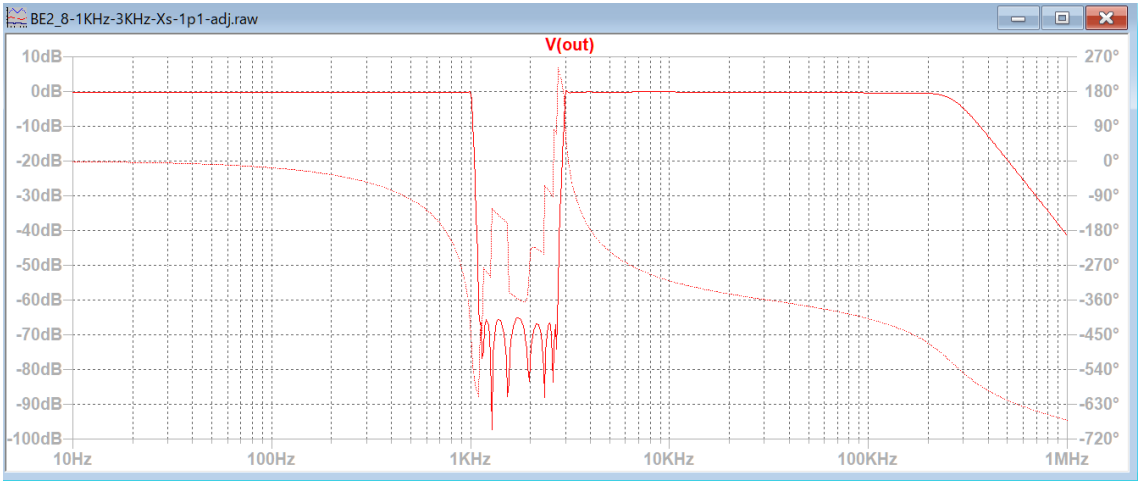


図 7 - 4 楕円関数 B E フィルタの周波数特性

バンドパスフィルタの通過域下端が阻止域下端、通過域上端が阻止域上端になります。

Fp1 と Fp2 は阻止域の下端と上端の周波数です。

最低減衰量を指定する周波数 Fs1 と Fs2 は、Fs1 が Fp1 の何倍なのかを表す Xs で示されます。



バターワースフィルタを設計する時

次数を入力しない時

設計パラメータの入力

フィルタの種類 B E フィルタ 遮断特性 バターワース

阻止帯域 下端の周波数 Fp1 : ( $Fs1 = Fp1 \times Xs$ ) 1 KHz

阻止帯域 上端の周波数 Fp2 : ( $Fs2 = Fp2 / Xs$ ) 3 KHz

周波数 Fp1, Fp2 における減衰量は 3.01dB とします

減衰量を指定する周波数を Fs1 として,  $Xs = Fs1 / Fp1$  を次の範囲で

入力して下さい  $1 < Xs <$  1.5 倍 OK

周波数 Fs1, Fs2 における減衰量 atts 60 dB キャンセル

- 「1 行目 Fp1」に阻止域の下端周波数 Fp1 を入力する。
- 「2 行目 Fp2」に阻止域の上端周波数 Fp2 を入力する。
- バターワースの場合、Fp1 と Fp2 における減衰量は 3.01dB となります。
- 「3 行目 Xs」に最低減衰量を指定する周波数 Fs1 と Fp1 の比 ( $Fs1 / Fp1$ ) を入力する。
- 「4 行目 atts」に周波数 Fs1 における最低減衰量 atts を入力する。

次数を入力する時

設計パラメータの入力

フィルタの種類 B E フィルタ 遮断特性 バターワース

設計するフィルタの次数 m(<=58) 3

阻止帯域 下端の周波数 Fp1 : ( $Fs1 = Fp1 \times Xs$ ) 1 KHz

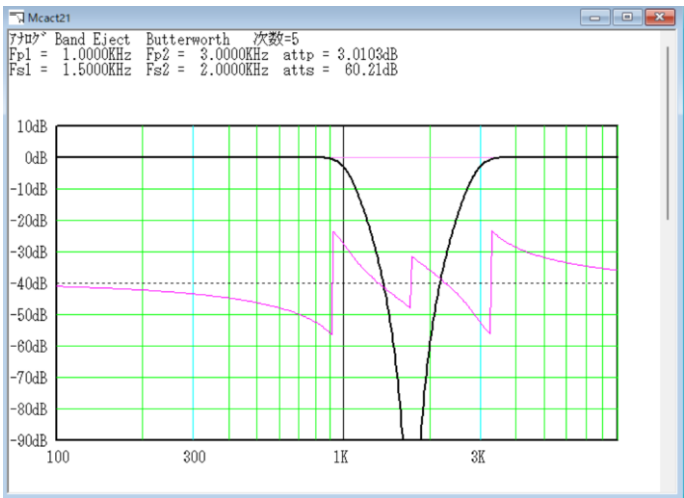
阻止帯域 上端の周波数 Fp2 : ( $Fs2 = Fp2 / Xs$ ) 3 KHz

最低減衰量に達する周波数を Fs1 として,  $Xs = Fs1 / Fp1$  を次の範囲で

入力して下さい  $1 < Xs <$  1.7321 1.5 倍 OK

キャンセル

- 「1 行目 m」にフィルタの次数 m を入力する。
  - 「2 行目 Fp1」に阻止域の下端周波数 Fp1 を入力する。
  - 「3 行目 Fp2」に阻止域の上端周波数 Fp2 を入力する。
  - 「4 行目 Xs」に最低減衰量を指定する周波数 Fs1 と Fp1 の比 ( $Fs1 / Fp1$ ) を入力する。
- Xs の上限は入力 Box の左側に表示されている数値 (1.7321) 以下にしてください。



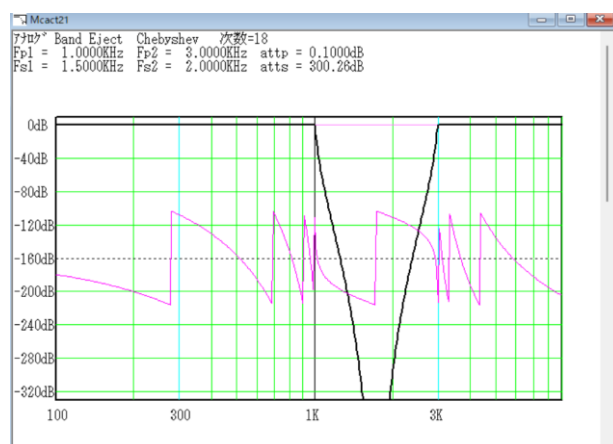
## チェビシェフ、逆チェビシェフ、楕円関数を設計する時

次数を入力しない時

- 「1 行目 Fp1」に阻止域の下端周波数 Fp1 を入力する。
- 「2 行目 Fp2」に阻止域の上端周波数 Fp2 を入力する。
- 「3 行目 attp」に周波数 Fp1 のリプル attp を入力する。
- 「4 行目 Xs」に最低減衰量を指定する周波数 Fs1 と Fp1 の比 ( $Fs1/Fp1$ ) を入力する。  
Xs の上限は入力 Box の左側に表示されている数値 (1.7321) 以下にして下さい。
- 「5 行目 atts」に周波数 Fs1 における最低減衰量 atts を入力する。

次数を入力する時

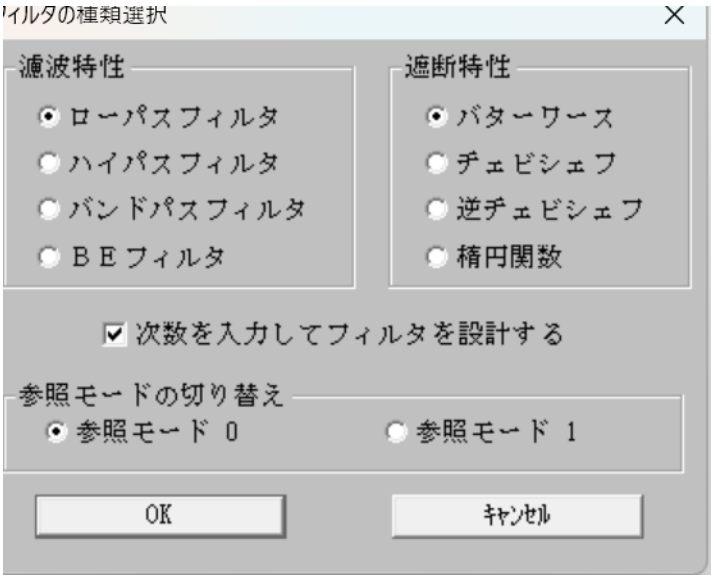
- 「1 行目 m」にフィルタの次数 m を入力する。
- 「2 行目 Fp1」に阻止域の下端周波数 Fp1 を入力する。
- 「3 行目 Fp2」に阻止域の上端周波数 Fp2 を入力する。
- 「4 行目 attp」に周波数 Fp1 のリプル attp を入力する。
- 「5 行目 Xs」に最低減衰量を指定する周波数 Fs1 と Fp1 の比 ( $Fs1/Fp1$ ) を入力する。  
Xs の上限は入力 Box の左側に表示されている数値 (1.7321) 以下にして下さい。



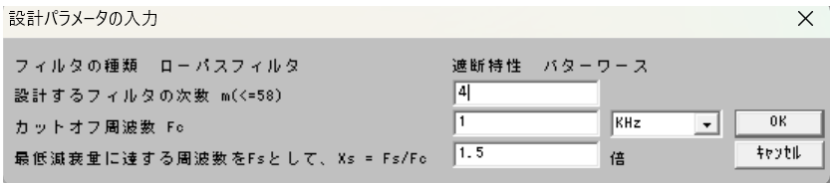
チェビシェフ、逆チェビシェフ、楕円関数を設計する時

LtAct によるフィルターの設計手順  
設計 1 バターワース・ローパスフィルタ

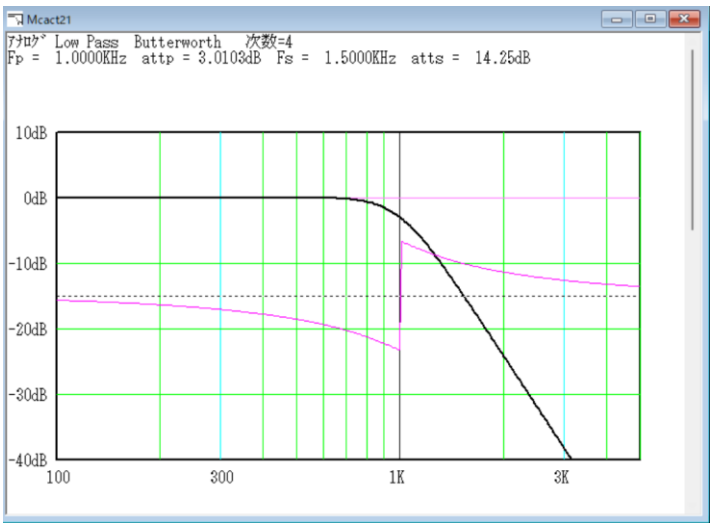
1. 最初に、設計するフィルタの種類を決定する。



2. カットオフ周波数が 1KHz で次数が 4 次のバターワースローパスフィルタを設計してみます。  
パラメータを入力して「OK」を押します。



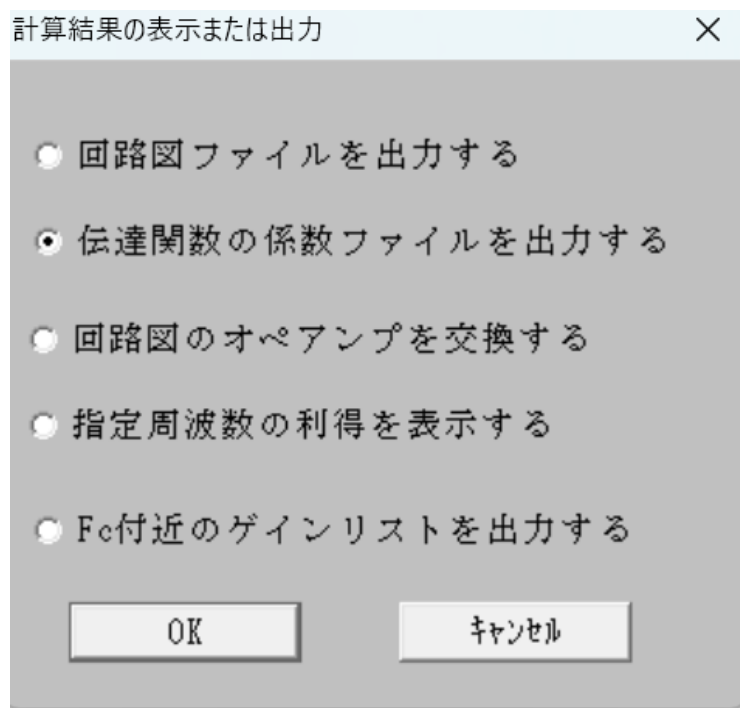
3. これで、設計が出来ました。周波数特性のグラフが表示されます。



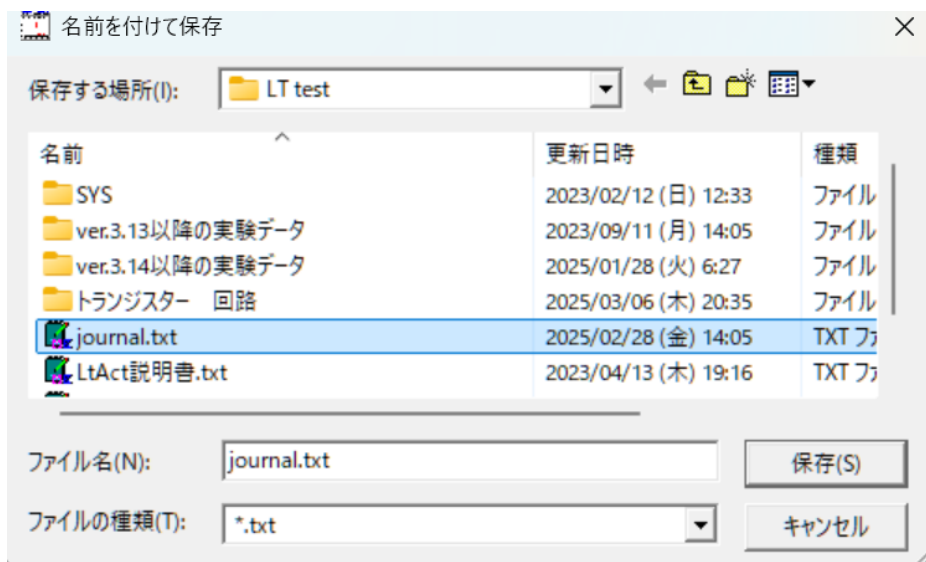
1. 最初に、設計するフィルタの種類を決定する。



4. 伝達関数の係数を出力します。「OK」を押します。



5. 係数リストのファイル名を入力して、「保存」を押します。



4. 伝達関数の係数を出力します。「OK」を押します。

## 6. 係数リスト(journal.txt)を確認する。

+++++++ 伝達関数の係数、カットオフ周波数、Q 値、GB 値 +++++++

アナログ Low Pass Butterworth 次数=4

Fp = 1.0000KHz attp = 3.0103dB Fs = 1.5000KHz atts = 14.25dB

2 次式の形式

$$Pn\_2 * s^2 + Pn\_3 * s + Pn\_4$$

Hn = -----

$$s^2 + Pn\_0 * s + Pn\_1$$

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	4.8089K	39.4784Meg	0	0	39.4784Meg
	Fc= 1.0000KHz	Fc ゲイン= 2.3226 dB	Q = 1.3066	GB 積=130.6563KHz	
2	11.6098K	39.4784Meg	0	0	39.4784Meg
	Fc= 1.0000KHz	Fc ゲイン= - 5.3329 dB	Q = 0.5412	GB 積= 54.1196KHz	

設計により伝達関数の係数が決定されて、次のように 2 次のフィルターが 2 個使用されることが分かる。

1 番目のフィルターの伝達関数

$$H_1 = \frac{39.4784\text{Meg}}{s^2 + 4.8089\text{K} \cdot s + 39.4784\text{Meg}}$$

2 番目のフィルターの伝達関数

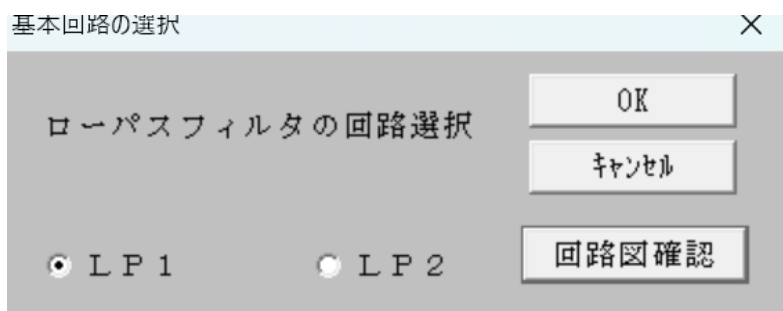
$$H_2 = \frac{39.4784\text{Meg}}{s^2 + 11.6098\text{K} \cdot s + 39.4784\text{Meg}}$$

1 番目も 2 番目もカットオフ周波数は 1KHz になることが分かる。

1 番目のカットオフ周波数におけるゲインと Q 値はそれぞれ、Fc ゲイン= 2.3226 dB Q = 1.3066 となり、オペアンプに要求される GB 積は 130.6563KHz 以上である。

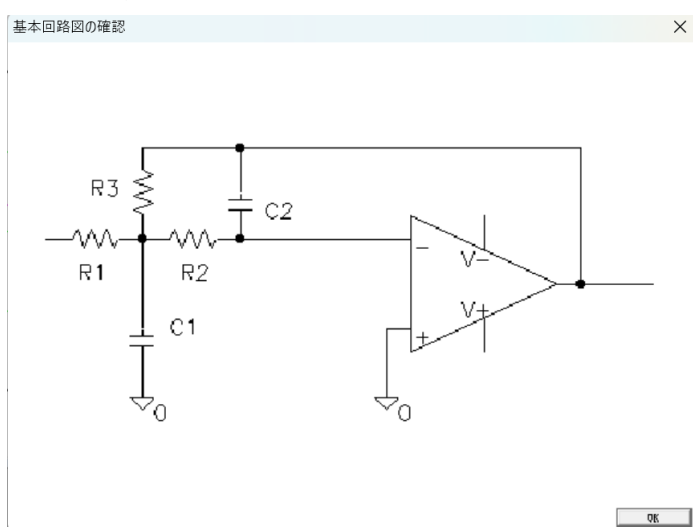
2 番目のカットオフ周波数におけるゲインと Q 値はそれぞれ、Fc ゲイン= - 5.3329 dB Q = 0.5412、オペアンプに要求される GB 積は 54.1196KHz 以上である。

## 7. 回路図のファイルを出力する。

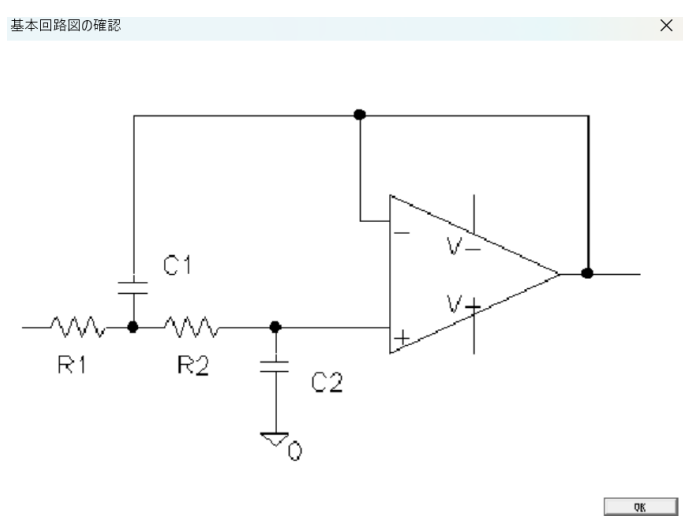


基本回路を選択して「OK」を押す。今回は、「LP1」または「LP2」が選択できる。

## LP1 の回路図



## LP2 の回路図



基本回路は「LP1」を選択します。

## 設計したフィルターを合成する

希望するフィルタのカットオフ周波数や次数などのパラメータを決定して、フィルタの伝達関数の係数に変換する手順が **フィルターの設計** です。

設計で決定された伝達関数の係数から、使用する回路の抵抗値とコンデンサの値を決定する手順は **フィルタの合成** です。

選択した基本回路 LP1 の伝達関数は以下の数式で表されます。

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{-\left(\frac{R_3}{R_1}\right)\left(\frac{1}{C_1 C_2 R_2 R_3}\right)}{s^2 + \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{C_1 R_1 R_2 R_3} s + \left(\frac{1}{C_1 C_2 R_2 R_3}\right)} \quad (2-3)$$

1 番目のフィルターの伝達関数

$$H_1 = \frac{39.4784\text{Meg}}{s^2 + 4.8089\text{K} \cdot s + 39.4784\text{Meg}}$$

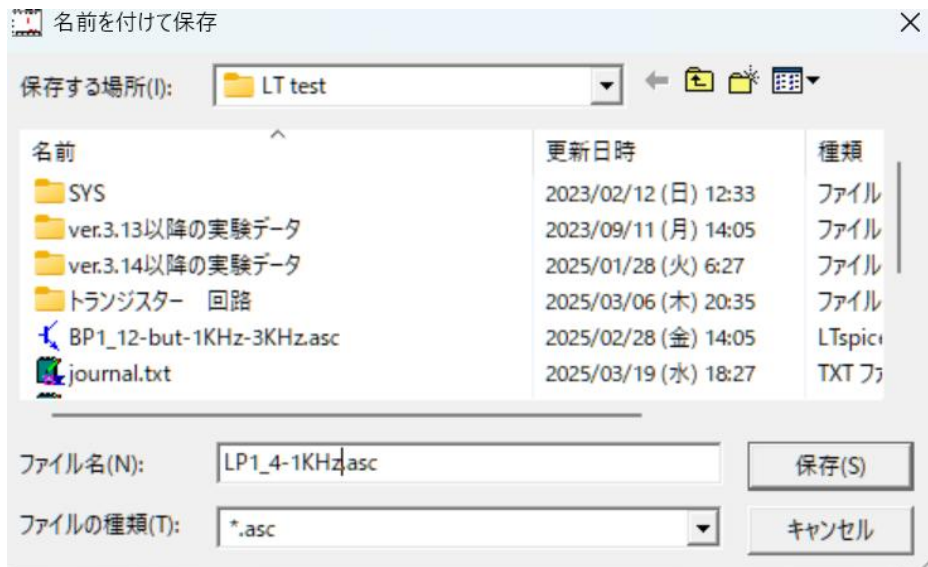
2 番目のフィルターの伝達関数

$$H_2 = \frac{39.4784\text{Meg}}{s^2 + 11.6098\text{K} \cdot s + 39.4784\text{Meg}}$$

係数リストから得られた 2 つの伝達関数 H1 と H2 のそれぞれが式 (2-3) を満たす抵抗値とコンデンサの値を決定することでフィルタの合成が完了します。

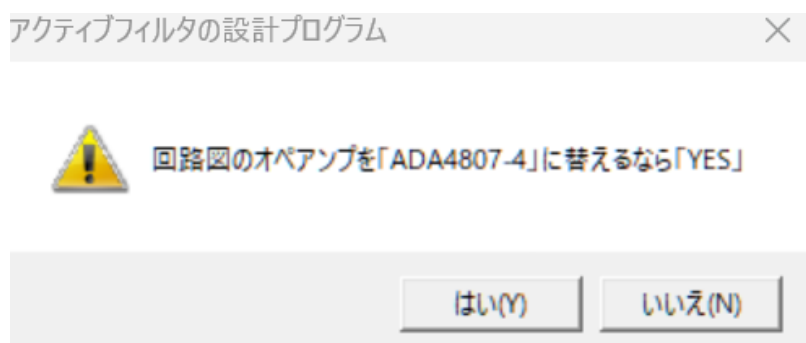
このフィルターの合成は、「フィルタごとの伝達関数と素子値の決定方法」→「ローパスフィルタ」→「バターワースとチェビシェフの決定方法」に説明してあります。

## 8. 回路図のファイル名を入力する。

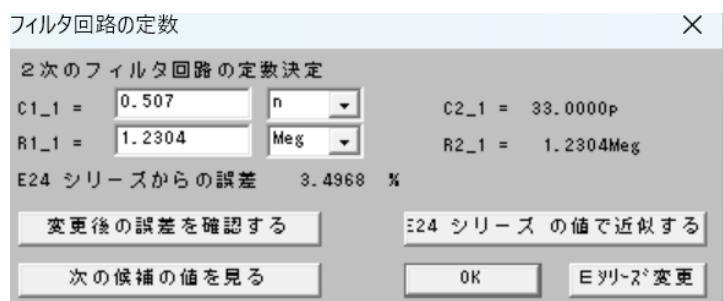


基本回路は「LP1」を選択して、ファイル名を「LP1\_4-1KHz.asc」と入力した。

## 9. 回路図のオペアンプを選択する。「はい」を押して「ADA4807-4」を選択する。



## 10. 回路の素子値を決定する。



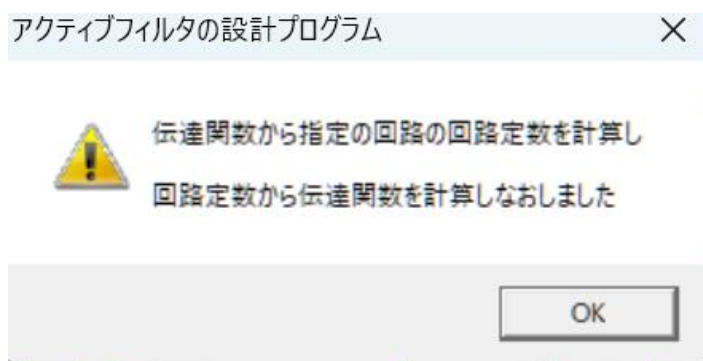
コンデンサと抵抗の推奨値が表示される。「OK」を押せば次の素子の決定に移る。  
ここでは「OK」を押す。

## 8. 回路図のファイル名を入力する。

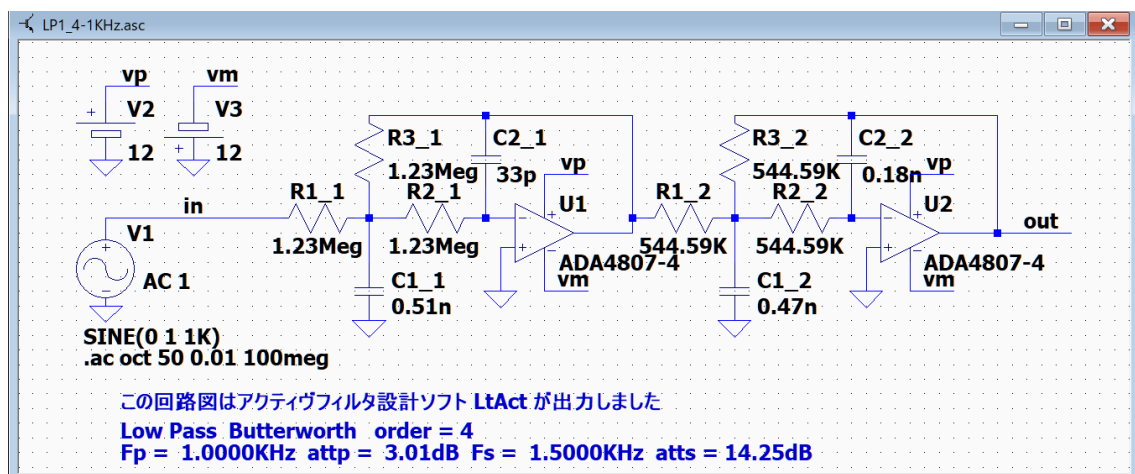
1 1. 2 番目の素子値も同様に「OK」を押す。



1 2. 回路図が完成した。

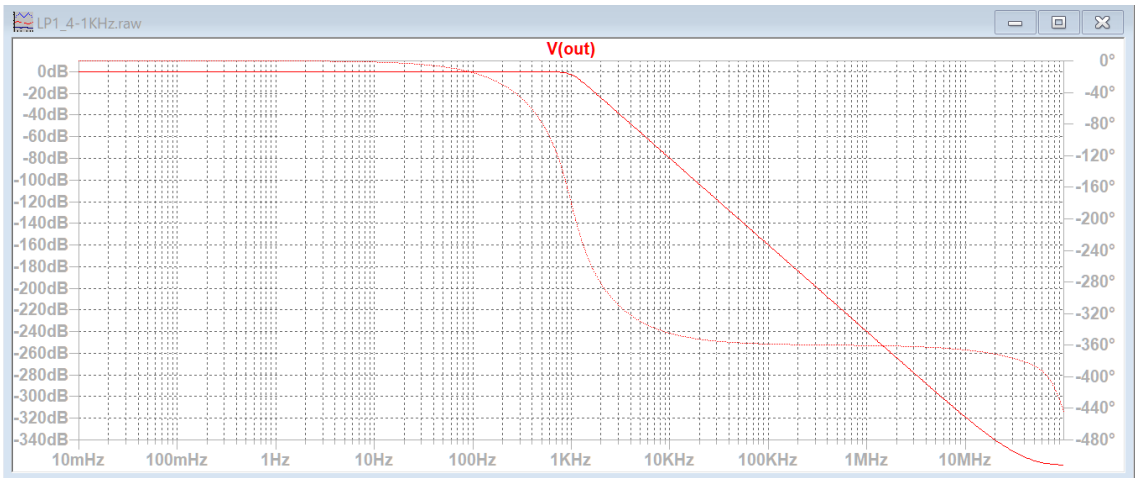


1 3. 「LTSpice」で回路図ファイル「LP1\_4-1KHz.asc」を開く。

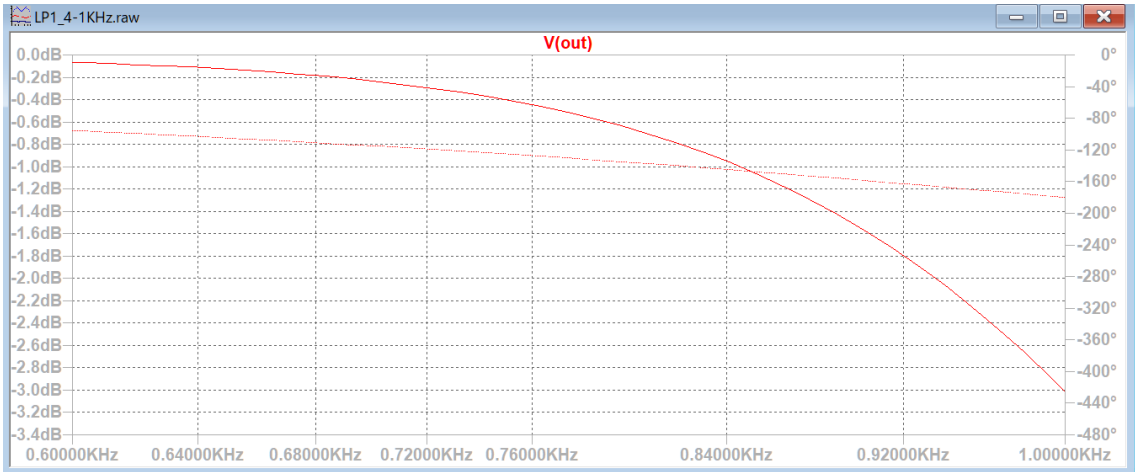


1 1. 2 番目の素子値も同様に「OK」を押す。

1 4. 「LTSpice」で周波数特性をシミュレーションする。



1KHz 付近を拡大表示する。設計の通り、1KHz のゲインは-3.04dB になっている。



1 5. 「journal.txt」を開いて、回路図の素子値を確認する。

\*\*\*\*\* 回路の構成と素子値 \*\*\*\*\*

回路図ファイル名 E:\tmp\LP1\_4-1KHz.asc 作成日時 Wed May 14 11:53:59 2025

アナログ Low Pass Butterworth 次数=4 参照モード=0

Fp = 1.0000KHz attp = 3.0103dB Fs = 1.5000KHz atts = 14.25dB

- 1 (LP1) 「LP1-0-2」 C1\_1 = 0.5070n C2\_1 = 33.0000p  
R1\_1 = R3\_1 = 1.2304Meg R2\_1 = 1.2304Meg 誤差 = 3.50 %  
2 (LP1) 「LP1-0-2」 C1\_2 = 0.4745n C2\_2 = 0.1800n  
R1\_2 = R3\_2 = 544.5926K R2\_2 = 544.5926K 誤差 = 4.00 %

1 4. 「LTSpice」で周波数特性をシミュレーションする。

## 設計 2 楕円関数・ローパスフィルタ

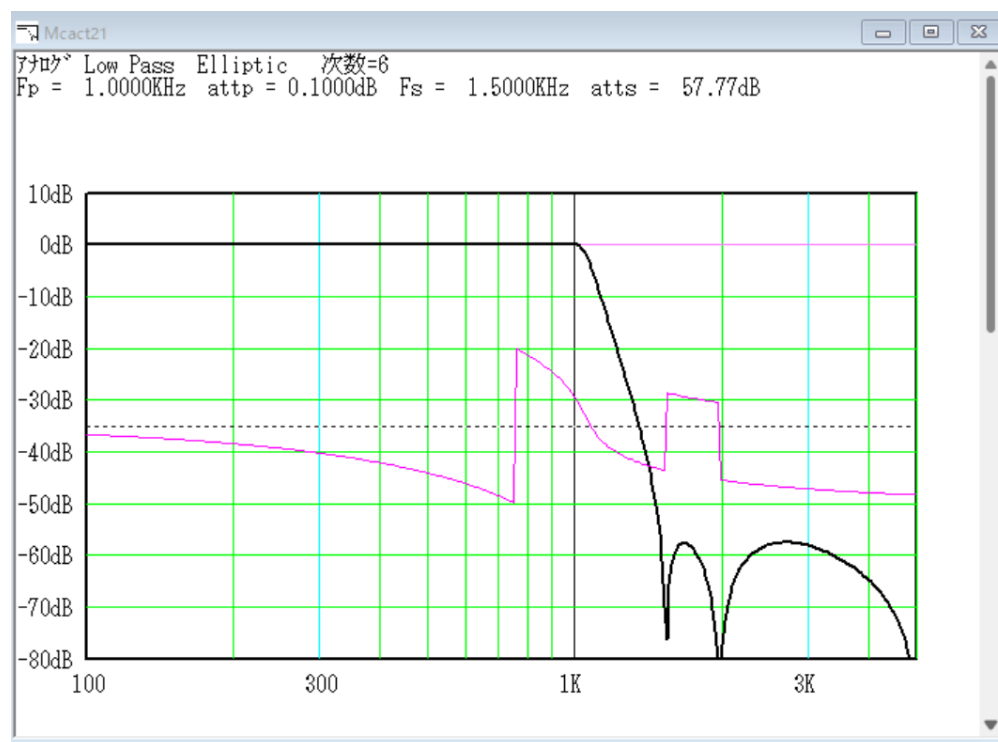
カットオフ周波数 1KHz、リプル 0.1dB の 6 次楕円関数ローパスフィルタを設計する。

## パラメータの入力

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Elliptic
設計するフィルタの次数 $m(<=58)$	6		
カットオフ周波数 $F_c$	1	KHz	
周波数 $F_c$ における減衰量又はリプル $att_p$	0.1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を $F_s$ として、 $X_s = F_s/F_c$	1.5	倍	キャンセル

周波数特性が表示される。



周波数 1KHz までのゲインは±0.1dB、周波数 1.5KHz のゲインは-57.77dB となることが分かる。



伝達関数の係数を確認する。

+++++++ 伝達関数の係数、カットオフ周波数、Q 値、GB 値 ++++++

アナログ Low Pass Elliptic 次数=6

Fp = 1.0000KHz attp = 0.1000dB Fs = 1.5000KHz atts = 57.77dB

2 次式の形式

$$Pn\_2 * s^2 + Pn\_3 * s + Pn\_4$$

Hn = -----

$$s^2 + Pn\_0 * s + Pn\_1$$

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	1.0101K	43.3580Meg	0.1089	0	111.0642Meg
	Fc= 1.0480KHz	Fc ゲイン= 24.0757 dB	Q = 6.5185	GB 積=683.1331KHz	
2	3.4858K	31.3449Meg	0.1089	0	16.8874Meg
	Fc= 891.0537 Hz	Fc ゲイン= - 3.2183 dB	Q = 1.6062	GB 積=143.1168KHz	
3	6.1303K	14.2238Meg	0.1089	0	10.1886Meg
	Fc= 600.2435 Hz	Fc ゲイン= - 8.5502 dB	Q = 0.6152	GB 積= 36.9279KHz	

設計により伝達関数の係数が決定されて、次のように 2 次のフィルターが 3 個使用されることが分かる。

1 番目のフィルターの伝達関数

$$H_1 = \frac{0.1089 \cdot s^2 + 111.0642\text{Meg}}{s^2 + 1.0101K \cdot s + 43.3580\text{Meg}}$$

2 番目のフィルターの伝達関数

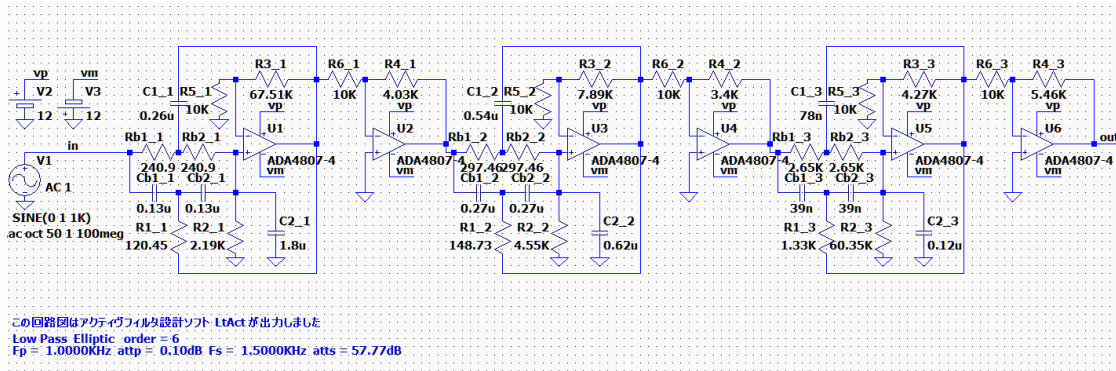
$$H_2 = \frac{0.1089 \cdot s^2 + 16.8874\text{Meg}}{s^2 + 3.4858K \cdot s + 31.3449\text{Meg}}$$

3 番目のフィルターの伝達関数

$$H_3 = \frac{0.1089 \cdot s^2 + 10.1886\text{Meg}}{s^2 + 6.1303K \cdot s + 14.2238\text{Meg}}$$

## 回路図作成

使用する基本回路は「et2」を選択して、全ての候補値を「OK」を押して、回路図を作成して「LTSpice」で開いてみる。



基本回路「et2」の伝達関数は次式で表されます。

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)}s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

1 番目のフィルターの伝達関数

$$H_1 = \frac{0.1089 \cdot s^2 + 111.0642 \text{Meg}}{s^2 + 1.0101K \cdot s + 43.3580 \text{Meg}}$$

2 番目のフィルターの伝達関数

$$H_2 = \frac{0.1089 \cdot s^2 + 16.8874 \text{Meg}}{s^2 + 3.4858K \cdot s + 31.3449 \text{Meg}}$$

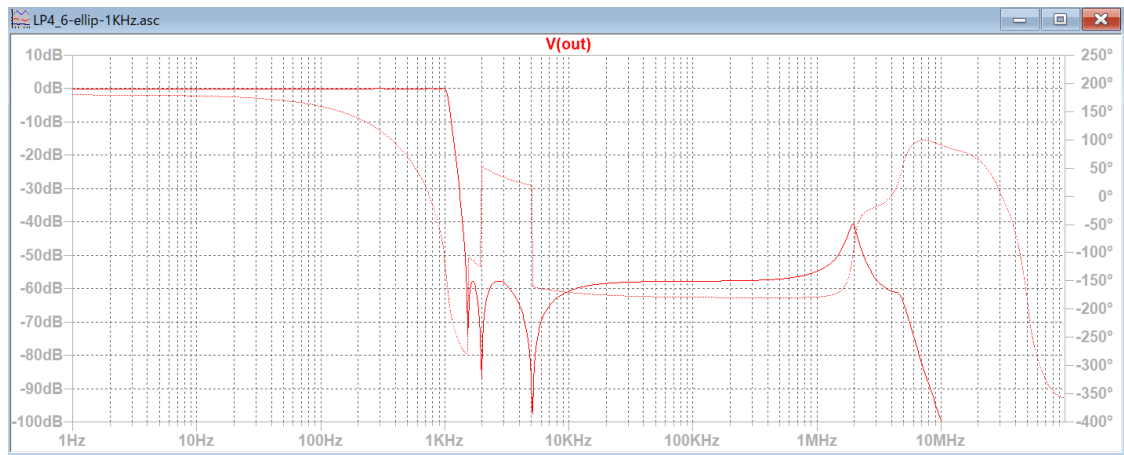
3 番目のフィルターの伝達関数

$$H_3 = \frac{0.1089 \cdot s^2 + 10.1886 \text{Meg}}{s^2 + 6.1303K \cdot s + 14.2238 \text{Meg}}$$

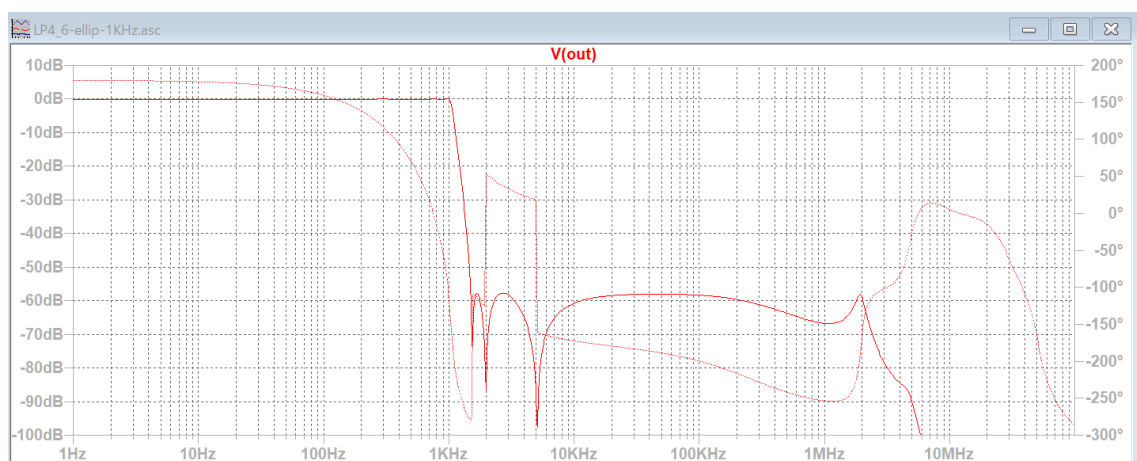
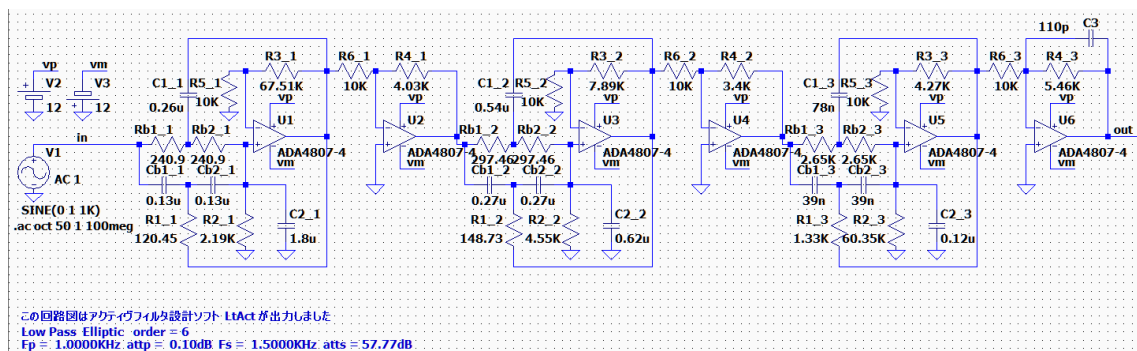
係数リストから得られた 3 つの伝達関数 H1～H3 のそれぞれが式 (2-6) を満たす抵抗値とコンデンサの値を決定することでフィルタの合成が完了します。

このフィルターの合成は、「フィルタごとの伝達関数と素子値の決定方法」→「ローパスフィルタ」→「楕円関数の決定方法」に説明してあります。

周波数特性を確認する。



阻止域の高域 2MHz 付近にピークがある。R4\_3 に C3=110p を並列に接続して調整する。



阻止域の高域 2MHz 付近にあったピークが消えた。

周波数特性を確認する。

## 回路図の素子値を確認する

\*\*\*\*\* 回路の構成と素子値 \*\*\*\*\*

回路図ファイル名 E:\LT test\LP4\_6-1KHz.asc 作成日時 Wed Mar 19 19:26:46 2025

アナログ Low Pass Elliptic 次数=6

参照モード=0

Fp = 1.0000KHz attp = 0.1000dB Fs = 1.5000KHz atts = 57.77dB

1 (et2) 「LP4-0-0」 Rb\_1(2 個)= 240.9005 Cb\_1(2 個)= 0.1300u R1\_1 = 120.4503 C1\_1 =  
0.2600u 誤差=3.88 %

1 R2\_1 = 2.1890K C2\_1 = 1.8000u 誤差 = 0.50 %

1 R3\_1 = 67.5118K R5\_1 = 10.0000K 誤差 = 0.72 %

1 R4\_1 = 4.0321K R6\_1 = 10.0000K 誤差 = 3.28 %

2 (et2) 「LP4-0-1」 Rb\_2(2 個)= 297.4562 Cb\_2(2 個)= 0.2700u R1\_2 = 148.7281 C1\_2 =  
0.5400u 誤差=3.90 %

2 R2\_2 = 4.5511K C2\_2 = 0.6200u 誤差 = 3.27 %

2 R3\_2 = 7.8941K R5\_2 = 10.0000K 誤差 = 3.87 %

2 R4\_2 = 3.4044K R6\_2 = 10.0000K 誤差 = 3.07 %

3 (et2) 「LP4-0-2」 Rb\_3(2 個)= 2.6512K Cb\_3(2 個)= 39.0000n R1\_3 = 1.3256K C1\_3 =  
78.0000n 誤差=4.68 %

3 R2\_3 = 60.3453K C2\_3 = 0.1200u 誤差 = 2.74 %

3 R3\_3 = 4.2680K R5\_3 = 10.0000K 誤差 = 0.75 %

3 R4\_3 = 5.4615K R6\_3 = 10.0000K 誤差 = 2.54 %

設計 3 チェビシェフ・ハイパスフィルタ

カットオフ周波数が 1KHz、リプルが 0.1dB で次数が 4 次のチェビシェフ・ハイパスフィルタを設計してみます。

設計パラメータの入力

フィルタの種類 ハイパスフィルタ

設計するフィルタの次数 m(<=58) 4

カットオフ周波数 Fc 1 KHz

周波数Fcにおける減衰量又はリプル attp 0.1 dB

最低減衰量に達する周波数をFsとして、Xs = 1.5 倍

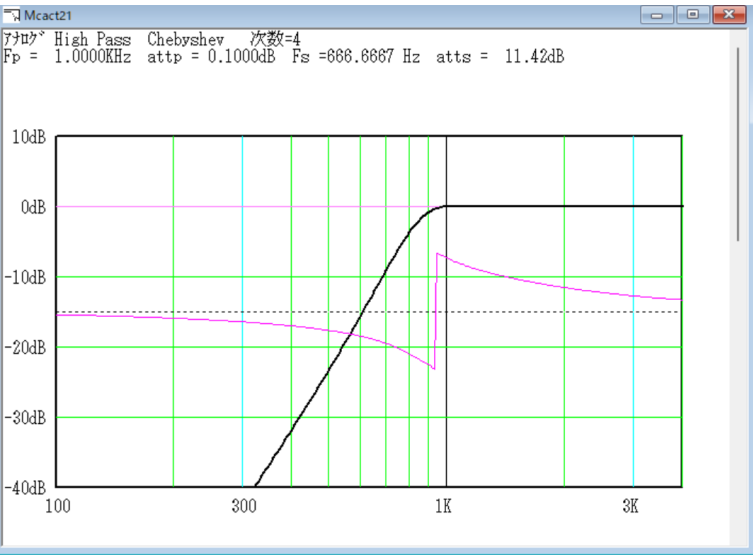
遮断特性 チェビシェフ

OK

キャンセル

チェビシェフフィルタを設計する時には、周波数の他にリプルの入力が必要です。

周波数特性のグラフ



伝達関数の係数を確認

+++++++ 伝達関数の係数、カットオフ周波数、Q 値、GB 値 +++++++

アナログ High Pass Chebyshev 次数=4

Fp = 1.0000KHz attp = 0.1000dB Fs =666.6667 Hz atts = 11.42dB

2 次式の形式

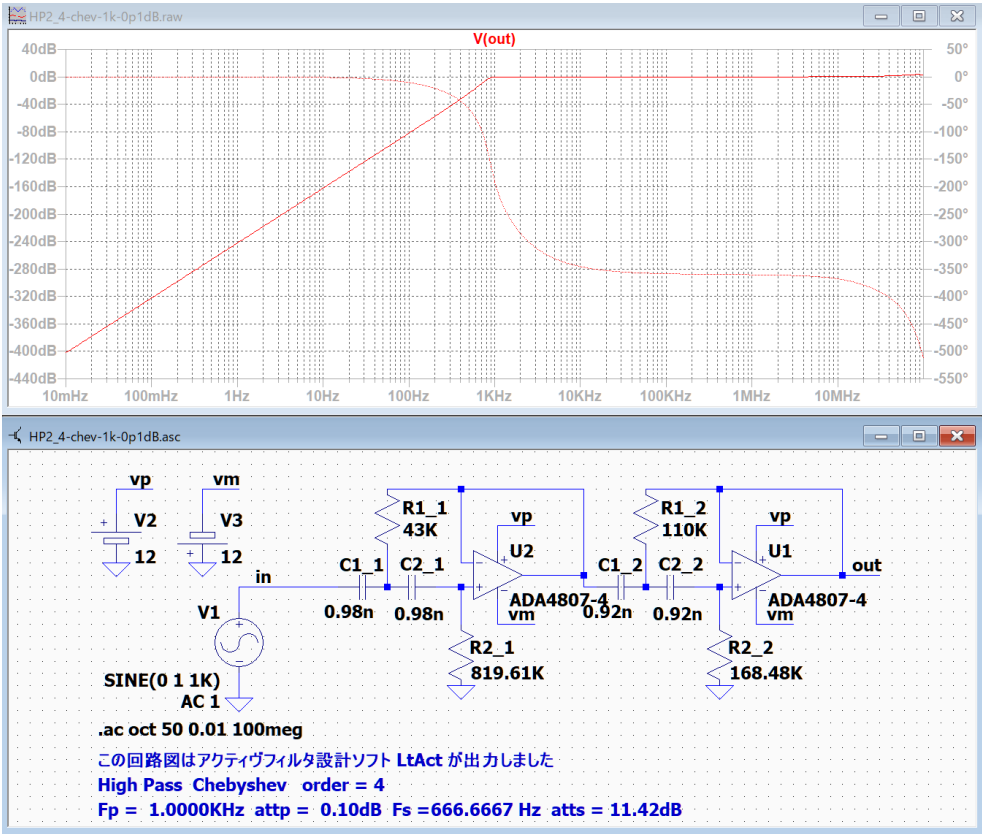
$$H_n = \frac{P_{n\_2} * s^2 + P_{n\_3} * s + P_{n\_4}}{s^2 + P_{n\_0} * s + P_{n\_1}}$$

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	2.4958K	29.6823Meg	1.0000	0	0
Fc= 867.0999 Hz Fc ゲイン= 6.7808 dB Q = 2.1829 GB 積=189.2819KHz					

2    12.8650K   63.3759Meg    1.0000            0            0  
Fc=        1.2670KHz   Fc ゲイン= - 4.1690 dB   Q=    0.6188   GB 積= 78.4031KHz

回路図と周波数特性



素子値の確認

\*\*\*\*\* 回路の構成と素子値 \*\*\*\*\*

回路図ファイル名 E:\tmp\HP2\_4-chev-1k-0p1dB.asc 作成日時 Wed May 14 12:11:53 2025

アナログ High Pass Chebyshev 次数=4 参照モード=0

Fp = 1.0000KHz attp = 0.1000dB Fs = 666.6667 Hz atts = 11.42dB

- 1 (HP2) 「HP2-0-1」 R1\_1 = 43.0000K R2\_1 = 819.6118K  
C1\_1 = 0.9777n C2\_1 = 0.9777n 誤差 = 1.#J %  
2 (HP2) 「HP2-0-2」 R1\_2 = 110.0000K R2\_2 = 168.4824K  
C1\_2 = 0.9227n C2\_2 = 0.9227n 誤差 = 1.#J %

## 設計 4 逆チェビシェフ・ハイパスフィルタ

カットオフ周波数が 1KHz、リップルが 0.1dB、カットオフ周波数の 1/1.5 倍（666.66Hz）においてゲインが -40dB 以下となる逆チェビシェフ・ハイパスフィルタを設計してみます。

## フィルタの選択

フィルタの種類選択

濾波特性	遮断特性
<input type="radio"/> ローパスフィルタ	<input type="radio"/> バターワース
<input checked="" type="radio"/> ハイパスフィルタ	<input type="radio"/> チェビシェフ
<input type="radio"/> バンドパスフィルタ	<input checked="" type="radio"/> 逆チェビシェフ
<input type="radio"/> B E フィルタ	<input type="radio"/> 楕円関数

☐ 次数を入力してフィルタを設計する

参照モードの切り替え

☒ 参照モード 0      ☐ 参照モード 1

OK      キャンセル

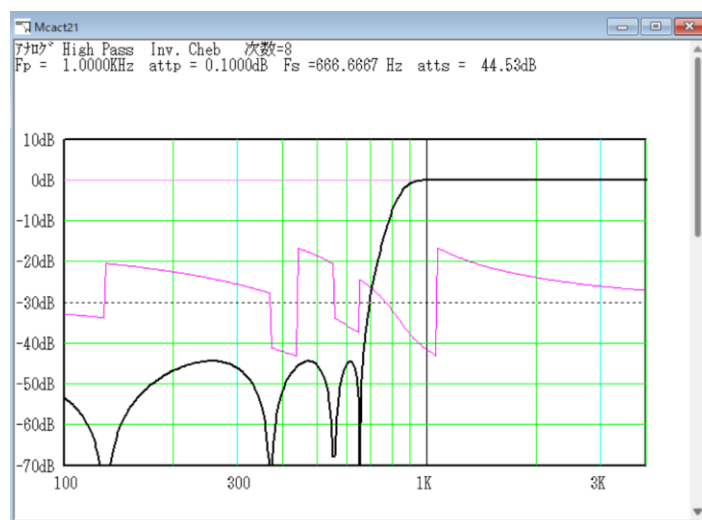
「次数を入力して…」をチェックしません。

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ハイパスフィルタ	遮断特性	Inv. Cheb
カットオフ周波数 $F_p$	1	Unit	KHz
周波数 $F_p$ における減衰量又はリップル $att_p$	0.1	Unit	dB
減衰量を指定する周波数を $F_s$ として、 $X_s = F_p/F_s$	1.5	Unit	倍
周波数 $F_s$ における減衰量 $atts$	40	Unit	dB

OK      キャンセル

## 周波数特性のグラフ



## 設計の結果

フィルタの次数が 8 に設計され、666.66Hz におけるゲインが -44.53dB になりました。

伝達関数の係数を確認

+++++++ 伝達関数の係数、カットオフ周波数、Q 値、GB 値 ++++++

アナログ High Pass Inv. Cheb 次数=8

Fp = 1.0000KHz attp = 0.1000dB Fs =666.6667 Hz atts = 44.53dB

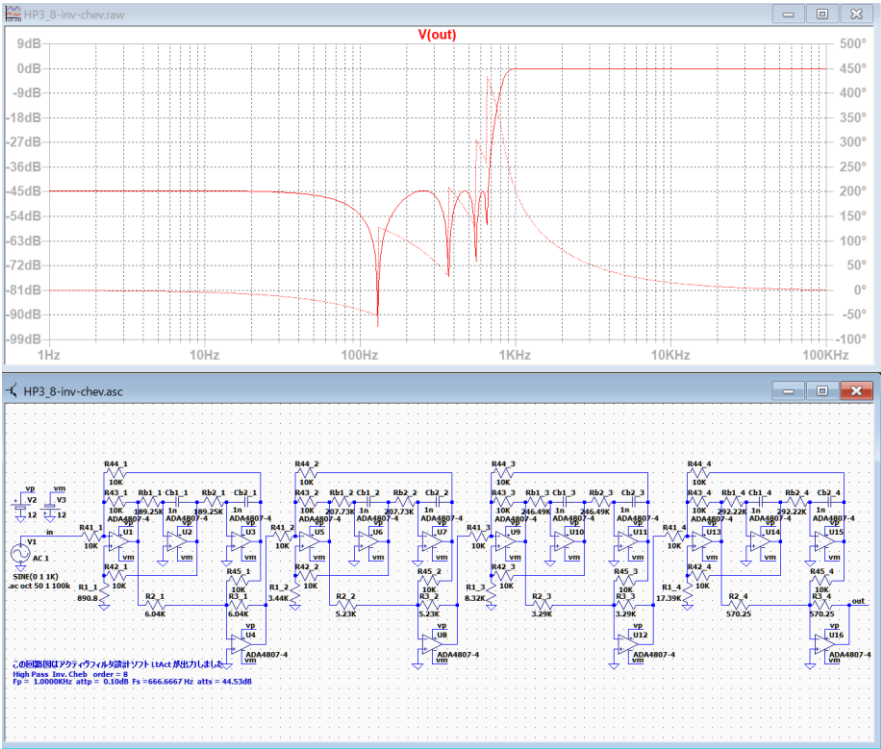
2 次式の形式

$$H_n = \frac{Pn\_2 * s^2 + Pn\_3 * s + Pn\_4}{s^2 + Pn\_0 * s + Pn\_1}$$

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	1.2966K	27.9210Meg	1.0000	0	16.8782Meg
	Fc= 840.9807 Hz Fc ゲイン= 4.1462 dB Q = 4.0753 GB 積=342.7243KHz				
2	3.6924K	23.1731Meg	1.0000	0	12.1303Meg
	Fc= 766.1480 Hz Fc ゲイン= - 4.1344 dB Q = 1.3037 GB 積= 99.8838KHz				
3	5.5261K	16.4586Meg	1.0000	0	5.4157Meg
	Fc= 645.6788 Hz Fc ゲイン= - 6.1506 dB Q = 0.7341 GB 積= 47.4018KHz				
4	6.5185K	11.7107Meg	1.0000	0	667.8035K
	Fc= 544.6424 Hz Fc ゲイン= - 6.1071 dB Q = 0.5250 GB 積= 28.5928KHz				

回路図と周波数特性





## 素子値の確認

\*\*\*\*\* 回路の構成と素子値 \*\*\*\*\*

回路図ファイル名 E:\tmp\HP3\_8-inv-chev.asc 作成日時 Wed May 14 12:02:37 2025

アナログ High Pass Inv. Cheb 次数=8 参照モード=0

Fp = 1.0000KHz attp = 0.1000dB Fs = 666.6667 Hz atts = 44.53dB

1 (et1) 「HP3-0-0」 Rb\_1(2 個)=189.2493K Cb\_1(2 個)= 1.0000n 誤差=4.89 %  
1 R1\_1 = 890.7988 R2\_1 = 6.0450K R3\_1 = 6.0450K R4\_1(5 個)= 10.0000K 誤差  
=4.22 %  
2 (et1) 「HP3-0-2」 Rb\_2(2 個)=207.7340K Cb\_2(2 個)= 1.0000n 誤差=3.72 %  
2 R1\_2 = 3.4351K R2\_2 = 5.2346K R3\_2 = 5.2346K R4\_2(5 個)= 10.0000K 誤差  
=5.36 %  
3 (et1) 「HP3-0-2」 Rb\_3(2 個)=246.4925K Cb\_3(2 個)= 1.0000n 誤差=2.63 %  
3 R1\_3 = 8.3166K R2\_3 = 3.2905K R3\_3 = 3.2905K R4\_3(5 個)= 10.0000K 誤差  
=1.46 %  
4 (et1) 「HP3-0-2」 Rb\_4(2 個)=292.2192K Cb\_4(2 個)= 1.0000n 誤差=2.66 %  
4 R1\_4 = 17.3928K R2\_4 = 570.2513 R3\_4 = 570.2513 R4\_4(5 個)= 10.0000K 誤差  
=4.32 %

設計 5 チェビシェフ・バンドパスフィルタ

通過域周波数が 10KHz から 20KHz、リップルが 0.1dB、次数が 6 次のチェビシェフ・バンドパスフィルタを設計してみます。

設計パラメータの入力

フィルタの種類    バンドパスフィルタ

設計するフィルタの次数  $m(\leq 58)$     6

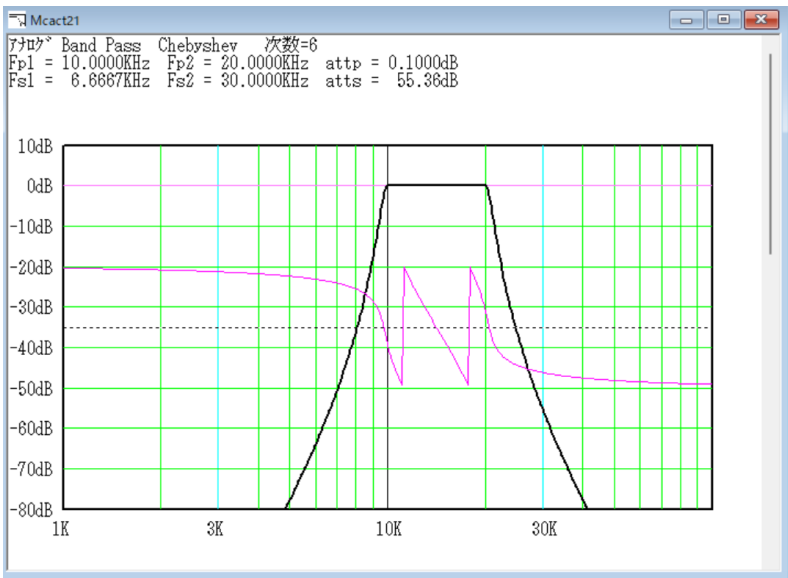
通過帯域    下端の周波数  $Fp1 : (Fs1 = Fp1/xs)$     10    KHz

通過帯域    上端の周波数  $Fp2 : (Fs2 = Fp1*xs)$     20    KHz

周波数  $Fp1, Fp2$  における減衰量又はリップル  $attp$     0.1    dB    OK

最低減衰量に達する周波数を  $Fs1$  として、 $xs = Fp1/Fs1$     1.5    倍   キャンセル

周波数特性のグラフ



伝達関数の係数を確認

+++++++ 伝達関数の係数、カットオフ周波数、Q 値、GB 値 +++++++

アナログ Band Pass Chebyshev 次数=6

$Fp1 = 10.0000\text{KHz}$     $Fp2 = 20.0000\text{KHz}$     $attp = 0.1000\text{dB}$

$Fs1 = 6.6667\text{KHz}$     $Fs2 = 30.0000\text{KHz}$     $atts = 55.36\text{dB}$

2 次式の形式

$$Pn\_2 * s^2 + Pn\_3 * s + Pn\_4$$

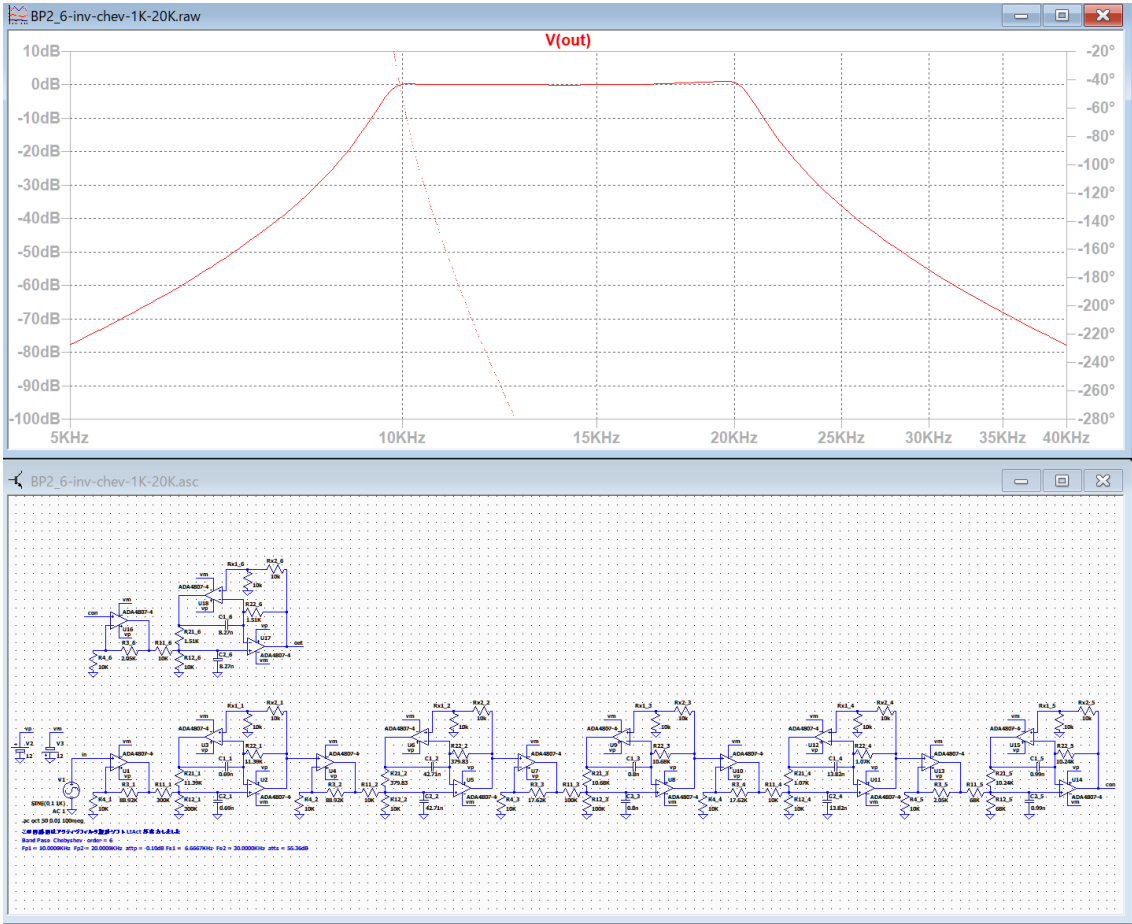
$$Hn = \frac{s^2 + Pn\_0 * s + Pn\_1}{Pn\_2 * s^2 + Pn\_3 * s + Pn\_4}$$

2 次式

n	$Pn\_0$	$Pn\_1$	$Pn\_2$	$Pn\_3$	$Pn\_4$
1	9.7297K	16.4041G	0	96.2458K	0
$Fc = 20.3843\text{KHz}$ $Fc$ ゲイン = 19.9057 dB $Q = 13.1637$ GB 積 = 265.4347MegHz					
2	4.6831K	3.8004G	0	46.3255K	0

	Fc=	9.8115KHz	Fc ゲイン=	19.9057 dB	Q =	13.1637	GB 積=127.7604MegHz
3		24.9091K	13.5943G	0	68.7994K	0	
	Fc=	18.5566KHz	Fc ゲイン=	8.8245 dB	Q =	4.6808	GB 積= 23.9909MegHz
4		14.4674K	4.5859G	0	39.9593K	0	
	Fc=	10.7778KHz	Fc ゲイン=	8.8245 dB	Q =	4.6808	GB 積= 13.9341MegHz
5		29.6037K	9.6645G	0	35.6739K	0	
	Fc=	15.6462KHz	Fc ゲイン=	1.6201 dB	Q =	3.3208	GB 積= 6.2612MegHz
6		24.1856K	6.4506G	0	29.1448K	0	
	Fc=	12.7826KHz	Fc ゲイン=	1.6201 dB	Q =	3.3208	GB 積= 5.1153MegHz

回路図と周波数特性



素子値の確認

\*\*\*\*\* 回路の構成と素子値 \*\*\*\*\*

回路図ファイル名 E:\LT test\BP2\_6-inv-chev-1K-20K.asc 作成日時 Sun Mar 23 17:21:15 2025

アナログ Band Pass Chebyshev 次数=6 参照モード=0

Fp1 = 10.0000KHz Fp2 = 20.0000KHz attp = 0.1000dB

Fs1 = 6.6667KHz Fs2 = 30.0000KHz atts = 55.36dB

1(BP2)「BP2-1-0」 R1\_1 (2 個) = 300.0000K C1\_1(2 個)= 0.6852n R2\_1(2 個)=  
11.3950K 誤差=3.55 %

1 R3\_1 = 88.9200K R4\_1 = 10.0000K 誤差 = 2.34 %

2(BP2)「BP2-0-0」 R1\_2 (2 個) = 10.0000K C1\_2(2 個)= 42.7065n R2\_2(2 個)=  
379.8326 誤差=2.76 %

2 R3\_2 = 88.9200K R4\_2 = 10.0000K 誤差 = 2.34 %

3(BP2)「BP2-1-0」 R1\_3 (2 個) = 100.0000K C1\_3(2 個)= 0.8029n R2\_3(2 個)=  
10.6819K 誤差=3.66 %

3 R3\_3 = 17.6202K R4\_3 = 10.0000K 誤差 = 2.16 %

4(BP2)「BP2-1-0」 R1\_4 (2 個) = 10.0000K C1\_4(2 個)= 13.8242n R2\_4(2 個)=  
1.0682K 誤差=6.66 %

4 R3\_4 = 17.6202K R4\_4 = 10.0000K 誤差 = 2.16 %

5(BP2)「BP2-1-1」 R1\_5 (2 個) = 68.0000K C1\_5(2 個)= 0.9935n R2\_5(2 個)=  
10.2385K 誤差=2.42 %

5 R3\_5 = 2.0505K R4\_5 = 10.0000K 誤差 = 2.46 %

6(BP2)「BP2-1-1」 R1\_6 (2 個) = 10.0000K C1\_6(2 個)= 8.2694n R2\_6(2 個)=  
1.5057K 誤差=0.92 %

6 R3\_6 = 2.0505K R4\_6 = 10.0000K 誤差 = 2.46 %

設計 6 楕円関数・バンドエリミネーションフィルタ

通過域周波数が 10KHz から 50KHz、リプルが 0.1dB、最低減衰量までの倍率が 1.3 で次数が 6 次の楕円関数・バンドエリミネーションフィルタを設計してみます。

設計パラメータの入力

フィルタの種類    B E フィルタ

遮断特性    Elliptic

設計するフィルタの次数  $m( \leq 58 )$     6

阻止帯域 下端の周波数  $F_{p1} : ( F_{s1} = F_{p1} \times x_s )$     10    KHz

阻止帯域 上端の周波数  $F_{p2} : ( F_{s2} = F_{p2} / x_s )$     50    KHz

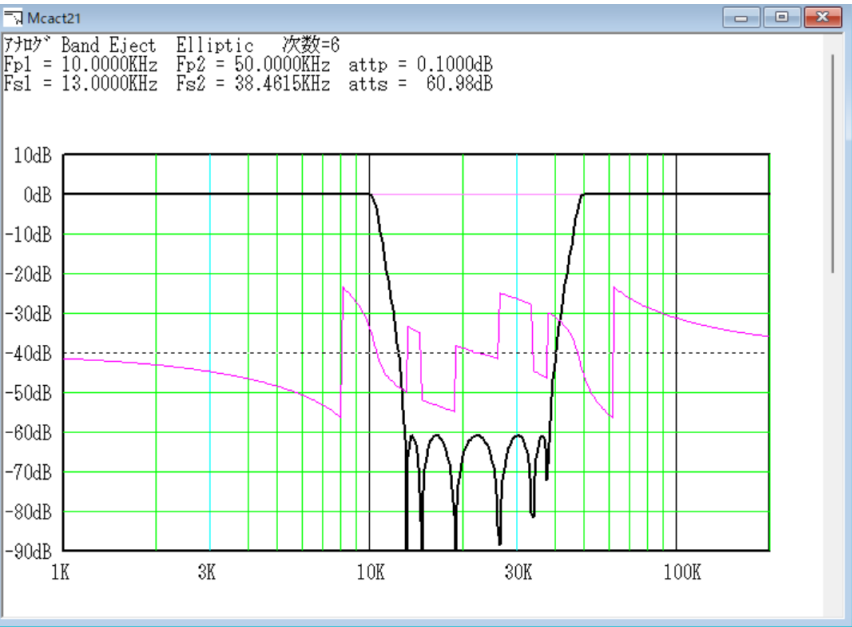
周波数  $F_{p1}, F_{p2}$  における減衰量又はリプル  $att_p$     0.1    dB

最低減衰量に達する周波数を  $F_{s1}$  として、 $x_s = F_{s1} / F_{p1}$  を次の範囲で

入力して下さい     $1 < x_s < 2.2361$     1.3    倍

OK    キャンセル

周波数特性のグラフ



阻止域下端の 10KHz の 1.3 倍の周波数で最低減衰量 60.98dB が得られています。

伝達関数の係数を確認

+++++++ 伝達関数の係数、カットオフ周波数、Q 値、GB 値 +++++++

アナログ Band Eject Elliptic 次数=6

Fp1 = 10.0000KHz    Fp2 = 50.0000KHz    attp = 0.1000dB

Fs1 = 13.0000KHz    Fs2 = 38.4615KHz    atts = 60.98dB

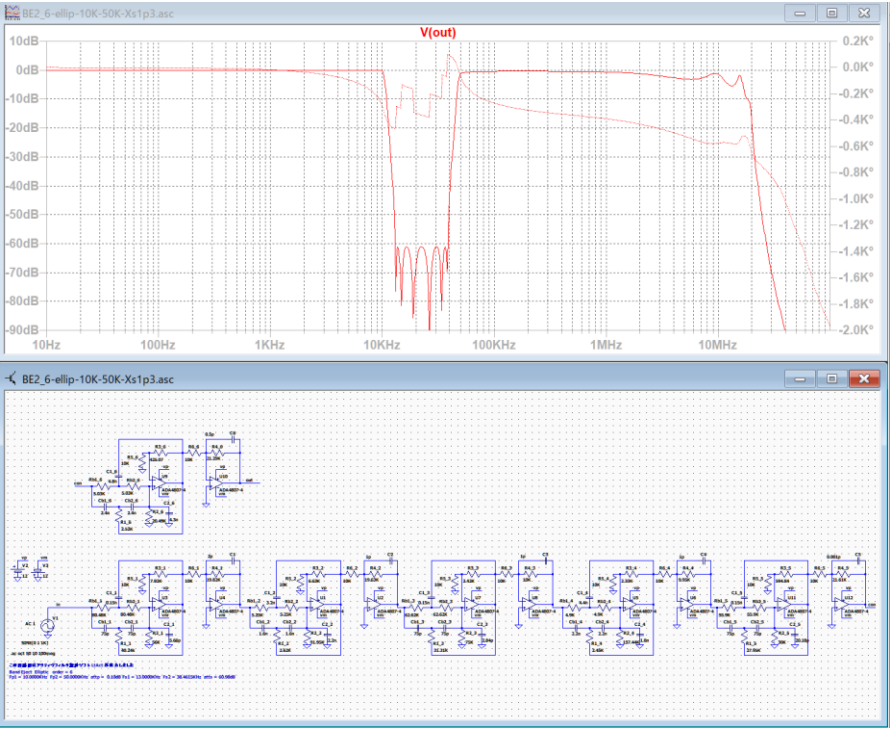
2 次式の形式

$$H_n = \frac{P_{n\_2} \cdot s^2 + P_{n\_3} \cdot s + P_{n\_4}}{s^2 + P_{n\_0} \cdot s + P_{n\_1}}$$

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	31.5370K	92.3898G	2.9301	0	80.4257G
Fc= 48.3763KHz Fc ゲイン= 25.9554 dB Q= 9.6381 GB 積= 46.6256MegHz					
2	6.7379K	4.2173G	0.8705	0	12.3571G
Fc= 10.3357KHz Fc ゲイン= 25.9554 dB Q= 9.6381 GB 積= 9.9616MegHz					
3	153.9187K	112.5065G	1.1550	0	52.3603G
Fc= 53.3838KHz Fc ゲイン= 3.5382 dB Q= 2.1792 GB 積= 11.6334MegHz					
4	27.0049K	3.4632G	0.4654	0	4.0001G
Fc= 9.3661KHz Fc ゲイン= 3.5382 dB Q= 2.1792 GB 積= 2.0411MegHz					
5	624.4802K	174.8367G	1.4886	0	84.6835G
Fc= 66.5482KHz Fc ゲイン= - 3.4476 dB Q= 0.6696 GB 積= 4.4559MegHz					
6	70.5044K	2.2286G	0.4844	0	3.3174G
Fc= 7.5134KHz Fc ゲイン= - 3.4476 dB Q= 0.6696 GB 積=503.0733KHz					

回路図と周波数特性



素子値の確認

\*\*\*\*\* 回路の構成と素子値 \*\*\*\*\*

回路図ファイル名 E:\LT test\BE2\_6-ellip-10K-50K-Xs1p3.asc 作成日時 Sun Mar 23 17:46:24 2025

アナログ Band Eject Elliptic 次数=6 参照モード=0

Fp1 = 10.0000KHz Fp2 = 50.0000KHz attp = 0.1000dB

Fs1 = 13.0000KHz Fs2 = 38.4615KHz atts = 60.98dB

1 (et2)「HP4-1-0」 Rb\_1(2 個)= 80.4788K Cb\_1(2 個)= 75.0000p R1\_1 = 40.2394K C1\_1 = 0.1500n 誤差=3.61 %

1 R2\_1 = 56.0000K C2\_1 = 5.6627p 誤差 = 1.11 %

1 R3\_1 = 7.0154K R5\_1 = 10.0000K 誤差 = 3.07 %

1 R4\_1 = 19.8206K R6\_1 = 10.0000K 誤差 = 0.91 %

2 (et2)「LP4-1-0」 Rb\_2(2 個)= 5.2458K Cb\_2(2 個)= 1.6000n R1\_2 = 2.6229K C1\_2 = 3.2000n 誤差=5.11 %

2 R2\_2 = 91.9549K C2\_2 = 2.2000n 誤差 = 1.04 %

2 R3\_2 = 6.6301K R5\_2 = 10.0000K 誤差 = 2.56 %

2 R4\_2 = 19.6295K R6\_2 = 10.0000K 誤差 = 1.89 %

3 (et2)「HP4-1-1」 Rb\_3(2 個)= 62.6228K Cb\_3(2 個)= 75.0000p R1\_3 = 31.3114K C1\_3 = 0.1500n 誤差=4.30 %

3 R2\_3 = 75.0000K C2\_3 = 2.8430p 誤差 = 5.03 %

3 R3\_3 = 2.4201K R5\_3 = 10.0000K 誤差 = 0.83 %

3 R4\_3 = 10.0046K R6\_3 = 10.0000K 誤差 = 0.05 %

4 (et2)「HP4-1-1」 Rb\_4(2 個)= 4.9029K Cb\_4(2 個)= 2.2000n R1\_4 = 2.4515K C1\_4 = 4.4000n 誤差=5.07 %

4 R2\_4 = 157.4396K C2\_4 = 1.8000n 誤差 = 1.63 %

4 R3\_4 = 2.3268K R5\_4 = 10.0000K 誤差 = 3.15 %

4 R4\_4 = 9.9536K R6\_4 = 10.0000K 誤差 = 0.47 %

5 (et2)「HP4-1-2」 Rb\_5(2 個)= 55.9015K Cb\_5(2 個)= 75.0000p R1\_5 = 27.9508K C1\_5 = 0.1500n 誤差=3.41 %

5 R2\_5 = 30.0000K C2\_5 = 20.1758p 誤差 = 0.87 %

5 R3\_5 = 594.8418 R5\_5 = 10.0000K 誤差 = 4.23 %

5 R4\_5 = 21.6091K R6\_5 = 10.0000K 誤差 = 1.81 %

6 (et2)「HP4-1-2」 Rb\_6(2 個)= 5.0347K Cb\_6(2 個)= 2.4000n R1\_6 = 2.5174K C1\_6 = 4.8000n 誤差=5.27 %

6 R2\_6 = 20.4934K C2\_6 = 4.3000n 誤差 = 2.41 %

6 R3\_6 = 425.0657 R5\_6 = 10.0000K 誤差 = 1.16 %

6 R4\_6 = 21.2946K R6\_6 = 10.0000K 誤差 = 3.31 %

設計 7 楕円関数・バンドパスフィルタ

設計パラメータの入力

フィルタの種類    バンドパスフィルタ

設計するフィルタの次数  $m(\leq 58)$     10

通過帯域    下端の周波数  $F_{p1}$  : ( $F_{s1} = F_{p1}/x_s$ )    10    Hz

通過帯域    上端の周波数  $F_{p2}$  : ( $F_{s2} = F_{p2} \times x_s$ )    100    KHz

周波数  $F_{p1}, F_{p2}$  における減衰量又はリプル  $attp$     0.01    dB    OK

最低減衰量に達する周波数を  $F_{s1}$  として、 $x_s = F_{p1}/F_{s1}$     1.2    倍    キャンセル

遮断特性    Elliptic

通過帯域が 10Hz から 100KHz でリプルが 0.01dB で阻止特性が急峻な 10 次の楕円関数バンドパスフィルタを設計してみました。

通過帯域下端の周波数を  $F_{p1}(10\text{Hz})$ 、最低減衰量に達する周波数を  $F_{s1}$  として、 $x_s=F_{p1}/F_{s1}$  を 1.2 に設定しました。これで  $F_{s1}=8.33\text{Hz}$  以下で最低減衰量に達します。

通過域上端におけるゲイン調整と阻止域におけるピークを調整しました。

伝達関数の係数

+++++++ 伝達関数の係数、カットオフ周波数、Q 値、GB 値 ++++++

アナログ Band Pass Elliptic 次数=10

$F_{p1} = 10.0000\text{ Hz}$     $F_{p2} = 100.0000\text{KHz}$     $attp = 0.0100\text{dB}$

$F_{s1} = 8.3333\text{ Hz}$     $F_{s2} = 120.0000\text{KHz}$     $atts = 74.92\text{dB}$

2 次式の形式

$$H_n = \frac{P_{n\_2} \cdot s^2 + P_{n\_3} \cdot s + P_{n\_4}}{s^2 + P_{n\_0} \cdot s + P_{n\_1}}$$

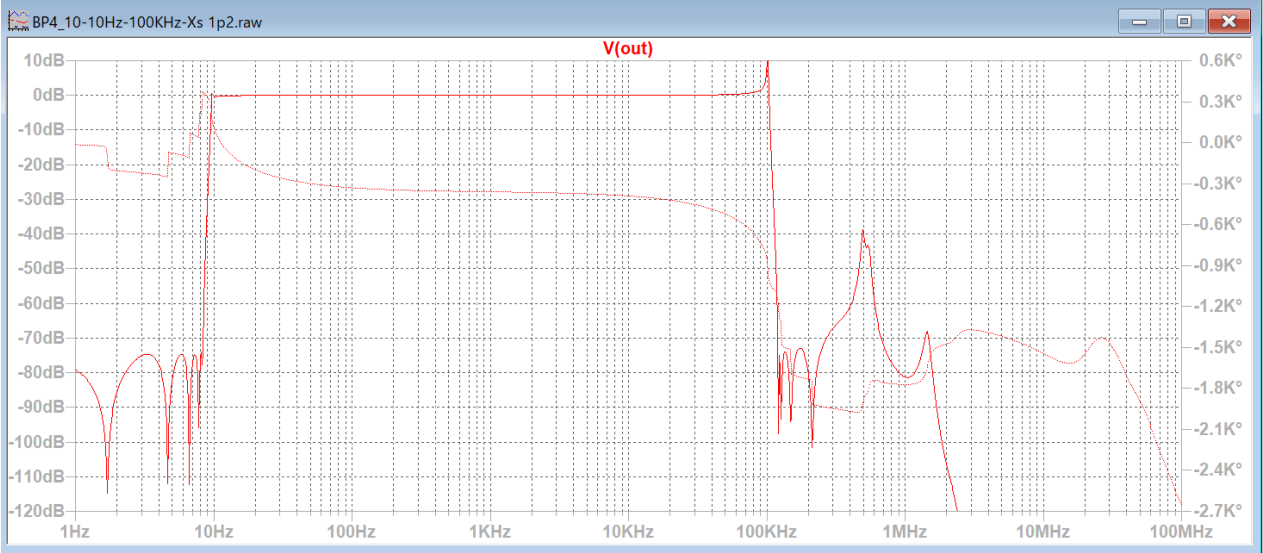
2 次式

n	$P_{n\_0}$	$P_{n\_1}$	$P_{n\_2}$	$P_{n\_3}$	$P_{n\_4}$
1	35.7660K	419.4301G	74.0575m	0	1.0089T
		$F_c = 103.0742\text{K}$	$Q = 18.1075$	$\text{GB 積} = 186.6418\text{Meg}$	
2	3.3664	3.7159K	2.4055	0	275.1878
		$F_c = 9.7018$	$Q = 18.1075$	$\text{GB 積} = 17.5675\text{K}$	
3	124.0526K	390.0195G	0.1959	0	354.6454G
		$F_c = 99.3947\text{K}$	$Q = 5.0343$	$\text{GB 積} = 50.0381\text{Meg}$	
4	12.5568	3.9961K	0.9093	0	782.8964
		$F_c = 10.0609$	$Q = 5.0343$	$\text{GB 積} = 5.0649\text{K}$	
5	261.3429K	323.7284G	0.2556	0	225.6261G
		$F_c = 90.5546\text{K}$	$Q = 2.1771$	$\text{GB 積} = 19.7147\text{Meg}$	



6	31.8706	4.8144K	0.6970	0	1.2306K
		Fc=	11.0431	Q =	2.1771 GB 積= 2.4042K
7	457.3365K	220.3315G	0.2461	0	159.4841G
		Fc=	74.7065K	Q =	1.0264 GB 積= 7.6676Meg
8	81.9443	7.0736K	0.7238	0	1.7409K
		Fc=	13.3857	Q =	1.0264 GB 積= 1.3739K
9	633.6715K	125.1068G	0.1967	0	113.3081G
		Fc=	56.2938K	Q =	0.5582 GB 積= 3.1422Meg
10	199.9599	12.4577K	0.9057	0	2.4504K
		Fc=	17.7639	Q =	0.5582 GB 積=991.5526

調整前の周波数特性

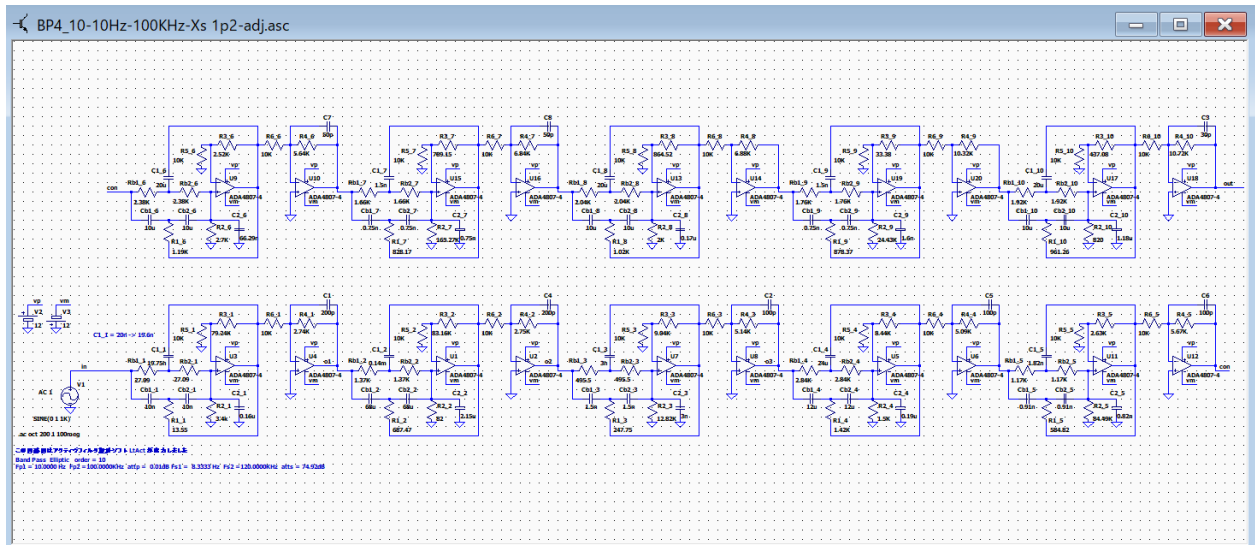


10Hzで -0.08dB と 100KHzで 8.4dB のピークが発生

9.7Hzで 0.46dB と 102KHzで 11.7dB のピークが発生。

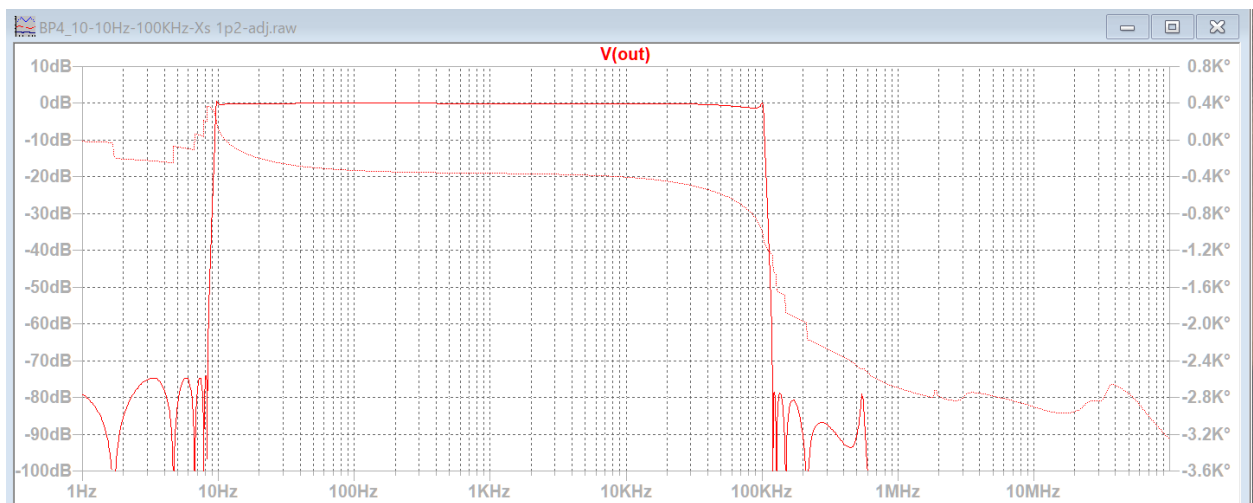
さらに、500KHz 付近にピークが発生。

完成した回路図



C1 から C7 を追加して、ピークを調整した。

調整後の周波数特性



## 素子値の確認

\*\*\*\*\* 回路の構成と素子値 \*\*\*\*\*

回路図ファイル名 E:\LT test\BP4\_10-10Hz-100KHz-Xs 1p2.asc 作成日時 Thu Jan 28

09:39:04 2021

アナログ Band Pass Elliptic 次数=10

参照モード=0

Fp1 = 10.0000 Hz Fp2 = 100.0000KHz attp = 0.0100dB

Fs1 = 8.3333 Hz Fs2 = 120.0000KHz atts = 74.92dB

1 (et2) 「LP4-2-0」 Rb\_1(2 個)= 27.0926 Cb\_1(2 個)= 10.0000n R1\_1 = 13.5463 C1\_1 = 20.0000n 誤差=4.05 %

1 R2\_1 = 3.3966K C2\_1 = 0.1600u 誤差 = 2.85 %

1 R3\_1 = 79.2405K R5\_1 = 10.0000K 誤差 = 3.48 %

1 R4\_1 = 2.7386K R6\_1 = 10.0000K 誤差 = 1.41 %

2 (et2) 「HP4-0-0」 Rb\_2(2 個)= 1.3749K Cb\_2(2 個)= 68.0000u R1\_2 = 687.4663 C1\_2 = 0.1360m 誤差=7.10 %

2 R2\_2 = 82.0000 C2\_2 = 2.1491u 誤差 = 2.37 %

2 R3\_2 = 83.1588K R5\_2 = 10.0000K 誤差 = 1.39 %

2 R4\_2 = 2.7454K R6\_2 = 10.0000K 誤差 = 1.65 %

3 (et2) 「HP4-2-0」 Rb\_3(2 個)= 495.5040 Cb\_3(2 個)= 1.5000n R1\_3 = 247.7520 C1\_3 = 3.0000n 誤差=4.28 %

3 R2\_3 = 12.8217K C2\_3 = 3.0000n 誤差 = 1.39 %

3 R3\_3 = 9.0407K R5\_3 = 10.0000K 誤差 = 0.66 %

3 R4\_3 = 5.1447K R6\_3 = 10.0000K 誤差 = 0.87 %

4 (et2) 「HP4-0-0」 Rb\_4(2 個)= 2.8400K Cb\_4(2 個)= 12.0000u R1\_4 = 1.4200K C1\_4 = 24.0000u 誤差=7.49 %

4 R2\_4 = 1.5000K C2\_4 = 0.1880u 誤差 = 4.25 %

4 R3\_4 = 8.4417K R5\_4 = 10.0000K 誤差 = 2.86 %

4 R4\_4 = 5.0852K R6\_4 = 10.0000K 誤差 = 0.29 %

5 (et2) 「HP4-2-1」 Rb\_5(2 個)= 1.1696K Cb\_5(2 個)= 0.9100n R1\_5 = 584.8159 C1\_5 = 1.8200n 誤差=5.09 %

5 R2\_5 = 84.4903K C2\_5 = 0.8200n 誤差 = 2.95 %

5 R3\_5 = 2.6260K R5\_5 = 10.0000K 誤差 = 2.82 %

5 R4\_5 = 5.6729K R6\_5 = 10.0000K 誤差 = 1.28 %

6 (et2) 「HP4-0-1」 Rb\_6(2 個)= 2.3799K Cb\_6(2 個)= 10.0000u R1\_6 = 1.1899K C1\_6 = 20.0000u 誤差=1.20 %

6 R2\_6 = 2.7000K C2\_6 = 66.2853n 誤差 = 2.59 %

6 R3\_6 = 2.5190K R5\_6 = 10.0000K 誤差 = 4.72 %  
6 R4\_6 = 5.6411K R6\_6 = 10.0000K 誤差 = 0.73 %  
7 (et2) 「HP4-2-2」 Rb\_7(2 個)= 1.6563K Cb\_7(2 個)= 0.7500n R1\_7 = 828.1695 C1\_7 =  
1.5000n 誤差=3.54 %  
7 R2\_7 = 165.2703K C2\_7 = 0.7500n 誤差 = 3.19 %  
7 R3\_7 = 789.1486 R5\_7 = 10.0000K 誤差 = 3.91 %  
7 R4\_7 = 6.8434K R6\_7 = 10.0000K 誤差 = 0.63 %  
8 (et2) 「HP4-0-2」 Rb\_8(2 個)= 2.0391K Cb\_8(2 個)= 10.0000u R1\_8 = 1.0195K C1\_8 =  
20.0000u 誤差=2.71 %  
8 R2\_8 = 2.0000K C2\_8 = 0.1666u 誤差 = 3.97 %  
8 R3\_8 = 864.5213 R5\_8 = 10.0000K 誤差 = 5.15 %  
8 R4\_8 = 6.8844K R6\_8 = 10.0000K 誤差 = 1.23 %  
9 (et2) 「HP4-2-2」 Rb\_9(2 個)= 1.7567K Cb\_9(2 個)= 0.7500n R1\_9 = 878.3708 C1\_9 =  
1.5000n 誤差=4.36 %  
9 R2\_9 = 24.4309K C2\_9 = 1.6000n 誤差 = 1.76 %  
9 R3\_9 = 33.3786 R5\_9 = 10.0000K 誤差 = 1.13 %  
9 R4\_9 = 10.3249K R6\_9 = 10.0000K 誤差 = 3.15 %  
10 (et2) 「HP4-0-2」 Rb\_10(2 個)= 1.9225K Cb\_10(2 個)= 10.0000u R1\_10 = 961.2606  
C1\_10 = 20.0000u 誤差=5.70 %  
10 R2\_10 = 820.0000 C2\_10 = 1.1778u 誤差 = 1.89 %  
10 R3\_10 = 437.0772 R5\_10 = 10.0000K 誤差 = 1.62 %  
10 R4\_10 = 10.7217K R6\_10 = 10.0000K 誤差 = 2.60 %

## フィルタごとの伝達関数と素子値の決定方法

### ローパスフィルタ

#### バターワース 伝達関数

フィルタの次数が $m$ の時、 $l = \text{ceil}((\text{double})(m-1)/2) - 1$  として

バターワースローパスフィルタの伝達関数は

$m$ が奇数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-7)$$

$m$ が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-8)$$

(1-7), (1-8) において

$$p_k = \cos\left(\frac{\pi(2k+1+m)}{2m}\right) \dots\dots (0 \leq k \leq l)$$

$$q_k = \sin\left(\frac{\pi(2k+1+m)}{2m}\right) \dots\dots (0 \leq k \leq l)$$

$$\omega_{ck} = \omega_c \sqrt{p_k^2 + q_k^2} = \omega_c \quad (1-9)$$

$$Q_k = -\frac{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}{2p_k} = -\frac{1}{2p_k}$$

$$\omega_c = 2\pi f_c$$

## チェビシェフ 伝達関数

チェビシェフローパスフィルタの次数 $m$ 、カットオフ周波数 $f_c$ ，通過域のリプル $\text{attp}(\text{db})$ とすると  
き、

$l = \text{ceil}((\text{double})(m-1)/2) - 1$  として

チェビシェフローパスフィルタの伝達関数は

$m$ が奇数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{\omega_d}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-31)$$

$m$ が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-32)$$

(1-31), (1-32) において

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\text{attp}/10} - 1}$$

$$a_k = \frac{\pi(2k+1)}{2m} \quad k = 0, \dots, l$$

$$d = \frac{1}{m} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)$$

$$p_k = \sin(a_k) \sinh(d) \quad k = 0, \dots, l$$

$$q_k = \cos(a_k) \cosh(d)$$

$$\omega_{ck} = \omega_c \sqrt{p_k^2 + q_k^2}$$

$$Q_k = \frac{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}{2p_k} \quad (1-32a)$$

$$\omega_d = \omega_c \sinh(d)$$

$$\omega_c = 2\pi f_c$$

## バターワースとチェビシェフ R,C 素子値の決定方法

バターワースとチェビシェフのローパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

1 次のフィルタ lp1 の後に、2 次のフィルタ（LP1 または LP2）が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

2 次のフィルタ（LP1 または LP2）が複数個使用されます。

バターワースの伝達関数は次式を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-7)$$

チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{\omega_d}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-31)$$

チェビシェフの1次の部分は（1-7）の  $\omega_c$  を  $\omega_d$  に変えれば素子値が決定できます。

チェビシェフの2次の部分はバターワースと同様に素子値が決定できます。

### 1 次の回路の素子値決定

#### バターワースの場合

1 次の回路は次式を使用する

$$H_1(\omega_c, s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (2-1)$$

1 次の回路部分

（1-7）より lp1 が使用されます。

（2-1）と（1-7）の1次の項を比較して、

$$\omega_c = \frac{1}{C_1 \cdot R_1} \quad (2-9)$$

ここで、 $\omega_c = 1, C_1 = 1$  とすると、

$$R_1 = \frac{1}{\omega_c \cdot C_1} = \frac{1}{1 \cdot 1} = 1$$

従って、 $C_1 = R_1 = 1$  (2-10)

ここで、インピーダンス変換係数 Z 及び周波数変換係数 F S F を導入します。

Z は C および R のインピーダンスを Z 倍する倍率を表わし、F S F は、カットオフ周波数を  $f_c$  とする時、 $FSF = 2\pi f_c$  を表わします。

(2-10)において、カットオフ周波数を $f_c$ , Rの値をZとすると、

$$FSF = 2\pi f_c$$

$$R_1 = Z$$

$$C_1 = 1/FSF/Z$$

(2-11)

### チェビシェフの場合

チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{\omega_d}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-31)$$

1次の回路は次式を使用する

$$H_1(\omega_c, s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (2-1)$$

(1-31)の1次部分と(2-1)より、

カットオフ周波数を $f_c$ , Rの値をZとすると、(1-32a)より、

$$\omega_c = 2\pi f_c, \omega_d = \omega_c \sinh(d), FSF = \omega_d$$

$$R_1 = Z$$

$$C_1 = 1/FSF/Z$$

(2-11)



## 2 次の回路の素子値決定

バターワースとチェビシェフの伝達関数は 2 次の部分が共通です。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-7)$$

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{\omega_d}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-31)$$

### LP1 を使用する場合

LP1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{-\left(\frac{R_3}{R_1}\right)\left(\frac{1}{C_1 C_2 R_2 R_3}\right)}{s^2 + \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{C_1 R_1 R_2 R_3} s + \left(\frac{1}{C_1 C_2 R_2 R_3}\right)} \quad (2-3)$$

(2-3) と (1-7) より、 $C_2 = C, C_1 = m \cdot C, R_1 = R, R_2 = k \cdot R, R_3 = R$  とすると、

$$\omega_{ck}^2 = \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2} = \frac{1}{mk(CR)^2} \quad (2-13)$$

$$\frac{\omega_{ck}}{Q_k} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{C_1 R_1 R_2 R_3} = \frac{1+2k}{mkCR} \quad (2-14)$$

(2-13) と (2-14) から、

$$\omega_{ck}^2 = \left(\frac{1+2k}{mkCR}\right)^2 Q_k^2 = \frac{1}{mk(CR)^2} \quad (2-15)$$

(2-15) から、与えられた正の実数mに対して、kは

$$4Q_k^2 k^2 + (4Q_k^2 - m)k + Q_k^2 = 0 \quad (2-16)$$

を満足するはずですが、kは正の実数でなければなりませんから、

$$A = 4Q_k^2, B = 4Q_k^2 - m \text{ とすると、 } k = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - A^2}}{2A} \text{ より、}$$

$$B \leq 0$$

$$\therefore m \geq 4Q_k^2 > 0 \quad (2-17)$$

また、判別式より、

$$D = (4Q_k^2 - m)^2 - 16Q_k^4 = m(m - 8Q_k^2) \geq 0 \quad (2-18)$$

$$\therefore m \geq 8Q_k^2$$

従って、FSFを適用して、

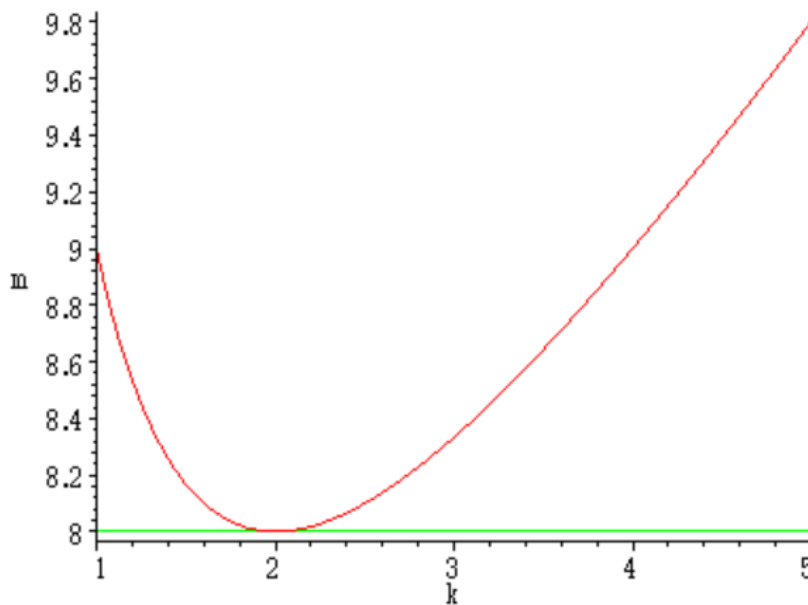
$$FSF = \sqrt{mk} \omega_{ck}, R_1 = R_3 = Z, R_2 = kZ, C_1 = m/Z/FSF, C_2 = 1/Z/FSF \quad (2-21)$$

ただし、 $m \geq 8Q_k^2$

(2-15) より、 $m = \frac{(1+2k)^2}{k} \cdot Q_k^2$  と表されるが、同時に (2-18) より、 $m \geq 8 \cdot Q_k^2$  が必要条件となる。

だが、 $k > 0$  なら  $\frac{(1+2k)^2}{k} \geq 8$  となるので  $k = 1$  にすると、 $m = \frac{(1+1 \cdot 2)^2}{1} \cdot Q_k^2 = 9 \cdot Q_k^2$  より、 $k = 1, m = 9 \cdot Q_k^2$  として計算する。

k=1に設定することで、R1=R2=R3となり素子値の種類が少なくなる。



**LP2 を使用する場合**

バターワースの伝達関数は次式の 2 次の部分を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-7)$$

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-8)$$

LP2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{1}{\frac{C_1 C_2 R_1 R_2}{s^2 + \frac{R_1 + R_2}{C_1 R_1 R_2} s + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}}} \quad (2-4)$$

(2-4) と (1-8) より、 $C_1 = mC, C_2 = C, R_1 = R, R_2 = kR$  とすると、

$$\omega_{ck}^2 = \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2} = \frac{1}{mk(CR)^2} \quad (2-22)$$

$$\frac{\omega_{ck}}{Q_k} = \frac{R_1 + R_2}{C_1 R_1 R_2} = \frac{1+k}{mkCR} \quad (2-23)$$

(2-22) と (2-23) から、

$$\omega_{ck}^2 = \left( \frac{1+k}{mkCR} \right)^2 Q_k^2 = \frac{1}{mk(CR)^2} \quad (2-24)$$

(2-24) から、与えられた正の実数  $m$  に対して、 $k$  は

$$Q_k^2 k^2 + (2Q_k^2 - m)k + Q_k^2 = 0 \quad (2-25)$$

を満足するはずですが、 $k$  は正の実数でなければなりませんから、

$$A = Q_k^2, B = 2Q_k^2 - m \text{ とすると、} k = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4A^2}}{2A} \text{ より、}$$

$$B \leq 0 \quad (2-26)$$

$$\therefore m \geq 2Q_k^2 > 0$$

また、判別式より、

$$D = (2Q_k^2 - m)^2 - 4Q_k^4 = m(m - 4Q_k^2) \geq 0 \quad (2-27)$$

$$\therefore m \geq 4Q_k^2$$

従って、変換係数  $Z$ 、 $FSF$  を適用して、

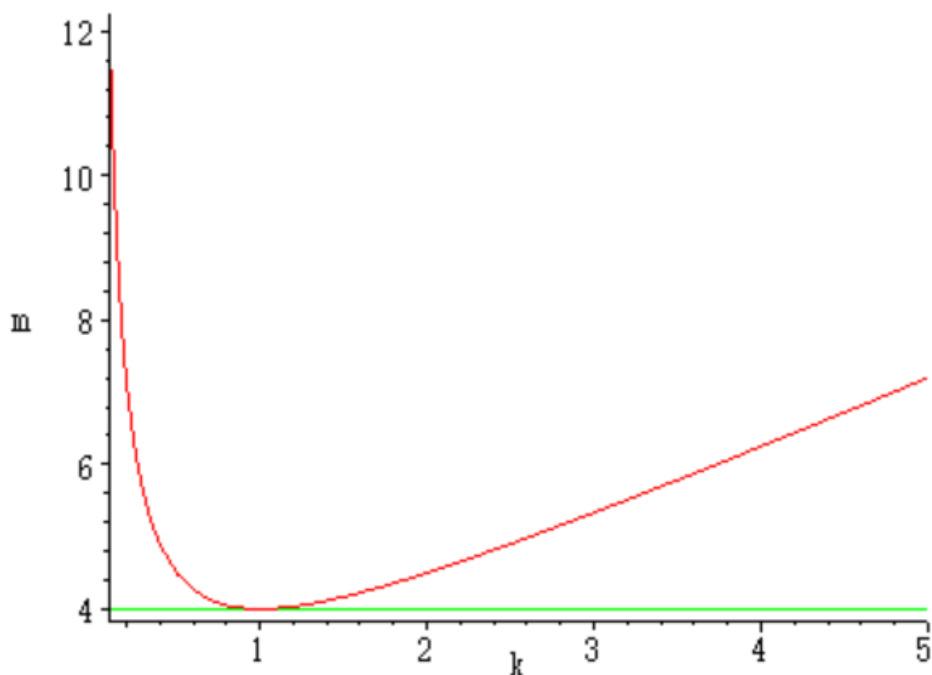
$$FSF = \sqrt{mk} \omega_{ck}, R_1 = Z, R_2 = kZ, C_1 = m/Z/FSF, C_2 = 1/Z/FSF \quad (2-30)$$

ただし、 $m \geq 4Q_k^2$

(2-24) より、 $m = \frac{(1+k)^2}{k} \cdot Q_k^2$  と表されるが、同時に (2-27) より、 $m \geq 4 \cdot Q_k^2$  が必要条件となる。

だが、 $k > 0$  なら  $\frac{(1+k)^2}{k} \geq 4$  となるので  $k = 1$  にすると、 $m = \frac{(1+1)^2}{1} \cdot Q_k^2 = 4 \cdot Q_k^2$  より、 $k = 1, m = 4 \cdot Q_k^2$  として計算する。

$k=1$ に設定することで、 $R_1=R_2$ となり素子値の種類が少なくなる。



### 電卓ソフトで計算する

高次数のフィルタは複数の基本回路により構成されます。

フィルタを設計して、回路図を合成した後で回路の一部の基本回路の素子値を調整したくなることがありますが、LtAct で回路図を作成する場合は回路全体を計算し直す必要があります。

このような時に、一部の回路ブロックの素子値だけを計算し直して LTSpice で周波数特性の確認が出来れば便利だと思います。

このために、現在 Vector で公開中の電卓ソフトを利用して、伝達関数の係数と希望する R や C などの値を与えて、素子値を計算する「マクロ」を作成しました。

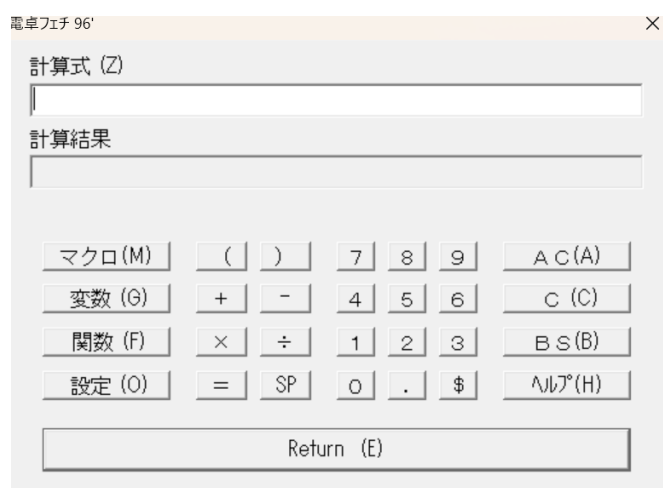
<https://www.vector.co.jp/soft/winnt/personal/se521045.html>

から「電卓プログラム Dt\_.exe」をダウンロードして下さい。

「アクティブフィルタの設計と合成」を格納したフォルダ内の「係数から素子値を計算する」フォルダ内の全てのファイルとフォルダを「電卓プログラム Dt\_.exe」を格納したフォルダにコピーして下さい。伝達関数の係数から回路図の R, C の素子値を計算するマクロ「Filter-Macro.UMF」が含まれています。フォルダ「LP1-LP2」から「BE1-2」には、「LtAct」で合成したフィルタの回路図ファイルと対応する「journal.txt」が格納されています。

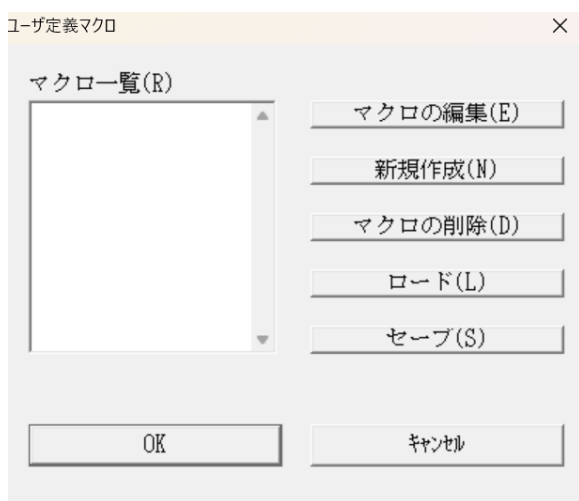
「journal.txt」の内容から、合成された回路図の伝達関数の係数と、回路図の R, C の値を知ることが出来ます。

「電卓プログラム Dt\_.exe」を解凍して、起動して下さい。



フィルタの係数から R, C の素子値を計算する場合は、「Filter-Macro.UMF」を「ロード」します。

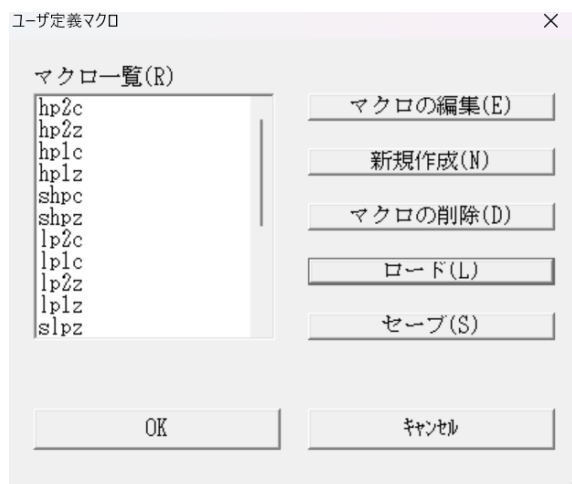
電卓画面の左側の「マクロ」をクリックします。



「ロード」をクリックします。

電卓を格納したフォルダから、  
「Filter-Macro.UMF」を選択します。

マクロの一覧が表示されます。



マクロの種類は、

「ローパス LP1, LP2」用

slpz, slpc, lp1z, lp1c, lp2z, lp2c,

「ハイパス HP1, HP2」用

shpz, shpc, hp1z, hp1c, hp2z, hp2c

「バンドパス BP1, BP2」用

bp1z, bp1c, bp2z, bp2c

「LP3, LP4, HP3, HP4, BP3, BP4, BE1, BE2」用

et1zkr, et1ckr, et2zkr, et2ckr

フォルダ「LP1-LP2」内の「journal.txt」を開いて下さい。LP1 と LP2 を設計・合成した回路の伝達関数の係数と回路図の R, C の素子値が記録されています。

LP1 の部分を以下に示します。

+++++++ 伝達関数の係数、カットオフ周波数、Q 値、GB 値 ++++++

アナログ Low Pass Butterworth 次数=3

Fp = 1.0000KHz attp = 3.0103dB Fs = 1.5000KHz atts = 10.93dB

1 次式の形式

$$P1 * s + P2$$

H0 = -----

$$s + P0$$

2 次式の形式

$$Pn\_2 * s^2 + Pn\_3 * s + Pn\_4$$

Hn = -----

$$s^2 + Pn\_0 * s + Pn\_1$$

1 次式

P0 = 6.2832K P1 = 0 P2 = 6.2832K Fc = 1.0000KHz Fc ゲイン = -

3.0103 dB

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	6.2832K	39.4784Meg	0	0	39.4784Meg

Fc = 1.0000KHz Fc ゲイン = 5.7860dB Q = 1.0000 GB 積 = 100.0000KHz

\*\*\*\*\* 回路の構成と素子値 \*\*\*\*\*

回路図ファイル名 E:\test\係数から素子値を計算する\LP1-LP2\LP1\_3-but.asc 作成日時 Sat

Apr 12 16:36:25 2025

アナログ Low Pass Butterworth 次数=3

参照モード=0

Fp = 1.0000KHz attp = 3.0103dB Fs = 1.5000KHz atts = 10.93dB

1 次のフィルタ回路

1(lp1) R1\_1 = 159.1549K C1\_1 = 1.0000n 誤差 = 0.53 %

2 (LP1) 「LP1-0-2」 C1\_2 = 0.5040n C2\_2 = 56.0000p

R1\_2 = R3\_2 = 947.3509K R2\_2 = 947.3509K 誤差 = 5.58 %

1 次のフィルタ回路

1(lp1) R1\_1 = 10.2611K C1\_1 = 16.0000n 誤差 = 2.54 %

2 (LP1) 「LP1-0-2」 C1\_2 = 51.0000n C2\_2 = 3.3000n

R1\_2 = R3\_2 = 10.1945K R2\_2 = 8.7372K 誤差 = 4.57 %

3 次のバターワースローパスフィルタで、カットオフ周波数は 1KHz です。

LP1\_3-but.asc の係数値を素子値に変換する時の入力例

1 次の回路の係数は、 $p_0=6.2832\text{K}$   $p_1=0$   $p_2=6.2832\text{K}$  で、回路図の R1 の素子値が  $159.1549\text{K}$  なので、次のように電卓に入力します。

$z=159.1549\text{K};p_0=6.2832\text{K};p_2=6.2832\text{K};\$slpz$

電卓への入力例は緑色で示します。

注意： $z=159.1549\text{K}$  のように数字と単位の間スペースを入れる。

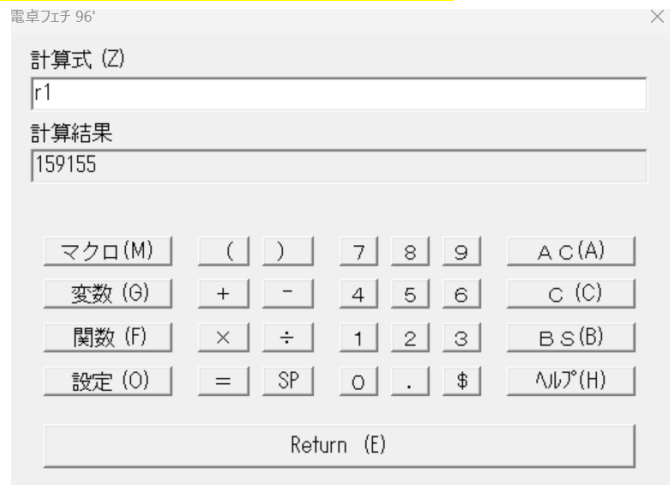
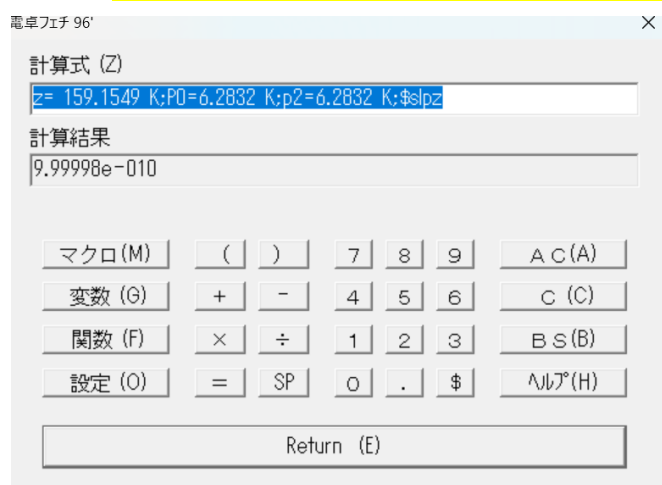
単位の後ろにスペースを入れない。マクロも同様。

入力後、リターンキーを押すと計算されます。

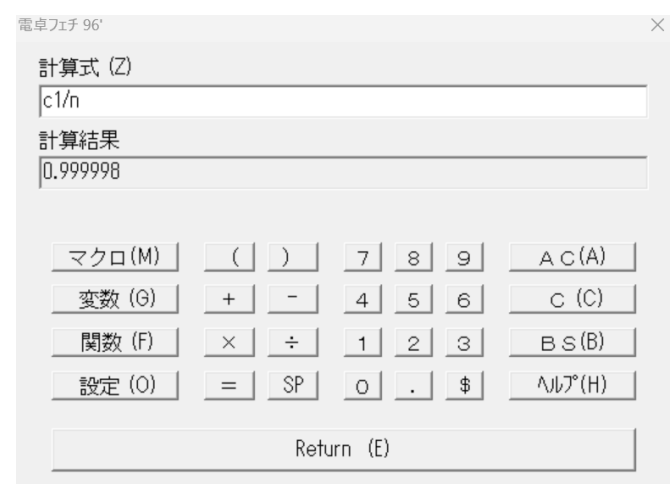
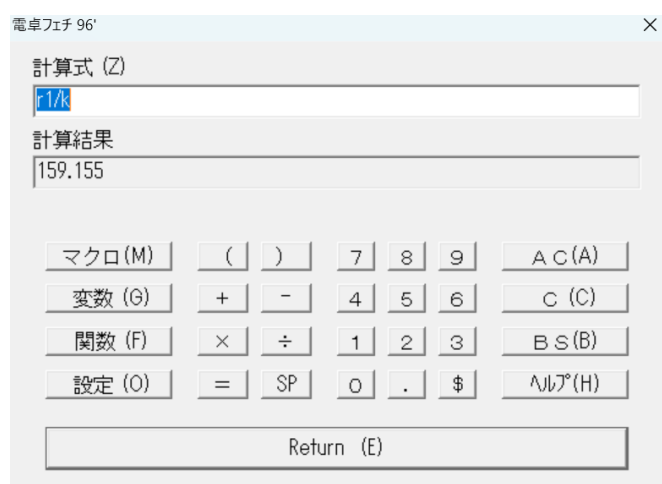
電卓の「変数」をクリックして「C1」の値を確認すると「 $9.999979323\text{e-}010$ 」と表示されますが、これは  $1\text{n}$  を表します。「R1」は「 $159154.9$ 」と表示され、 $159.1549\text{K}$  を表わします。

R1 の値は次の方法でも確認出来ます。

リターンキーを押して、入力の受付状態にして、r1 を入力してリターンキーを押します。



R1 を「K」単位で見るには「 $r1/k$ 」、C1 を「n」単位で見るには「 $c1/n$ 」と入力します。



$R1=159.155\text{K}$ 、 $C1=0.999998\text{n}$  (約  $1\text{n}$ ) と確認できます。



2 次の回路の係数は、 $p_0=6.2832K$   $p_1=39.4784\text{ Meg}$   $P_4=39.4784\text{ Meg}$  で、回路図の R1 の素子値が 947.3509 K なので、 $z=R1$  を指定する時は次のように電卓に入力します。

$z=947.3509\text{ k};P_0=6.2832\text{ K};p_1=39.4784\text{ Meg};p_4=39.4784\text{ Meg};\$1p1z$

入力後、リターンキーを押すと計算されます。

R1, R2 と R3 は、「947350.9」と表示されますが 947.3509 k を表わします。

C1 は「5.039987958e-010」と表示されますが 0.5039987958 n を表わします。

C2 は「5.600015307e-011」と表示されますが 56.00015307 p を表わします。

入力の受付状態にして、 $r1/k$ 、 $c1/n$ 、 $c2/p$  を入力してリターンキーを押すと確認できます。

電卓 (電卓 96')

計算式 (Z)

$r1/k$

計算結果

947.351

マクロ (M) ( ) 7 8 9 AC (A)

変数 (G) + - 4 5 6 C (C)

関数 (F) × ÷ 1 2 3 BS (B)

設定 (O) = SP 0 . \$ ° (H)

Return (E)

電卓 (電卓 96')

計算式 (Z)

$c1/n$

計算結果

0.503999

マクロ (M) ( ) 7 8 9 AC (A)

変数 (G) + - 4 5 6 C (C)

関数 (F) × ÷ 1 2 3 BS (B)

設定 (O) = SP 0 . \$ ° (H)

Return (E)

電卓 (電卓 96')

計算式 (Z)

$c2/p$

計算結果

56.0002

マクロ (M) ( ) 7 8 9 AC (A)

変数 (G) + - 4 5 6 C (C)

関数 (F) × ÷ 1 2 3 BS (B)

設定 (O) = SP 0 . \$ ° (H)

Return (E)

電卓 (電卓 96')

計算式 (Z)

$c2/n$

計算結果

5.60002e-002

マクロ (M) ( ) 7 8 9 AC (A)

変数 (G) + - 4 5 6 C (C)

関数 (F) × ÷ 1 2 3 BS (B)

設定 (O) = SP 0 . \$ ° (H)

Return (E)

R1= 947.351 K、C1= 0.503999 n、C2= 56.0002 p と確認できます。

C2/n と入力した場合は、C2=0.0560002 n (56.0002 p)と表示されます。

2 次の回路で、C=C2 を指定する場合は次のように入力します。

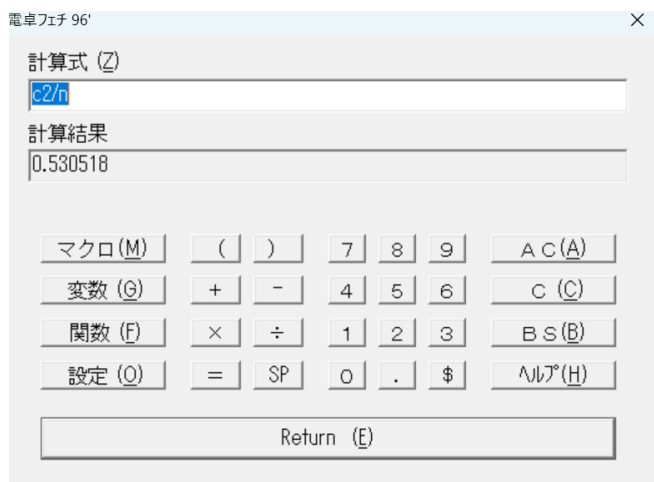
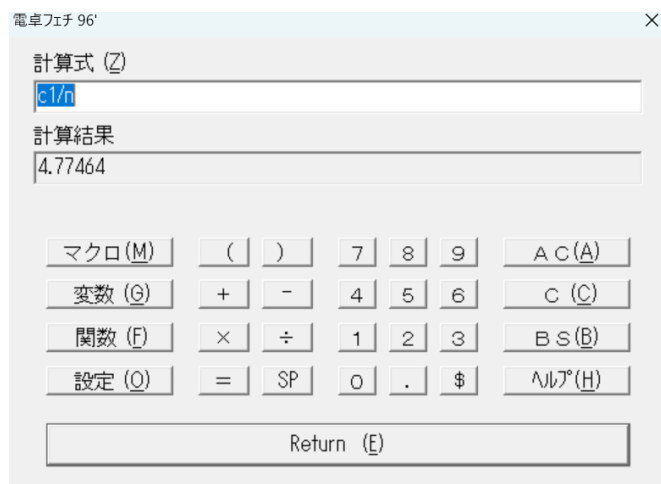
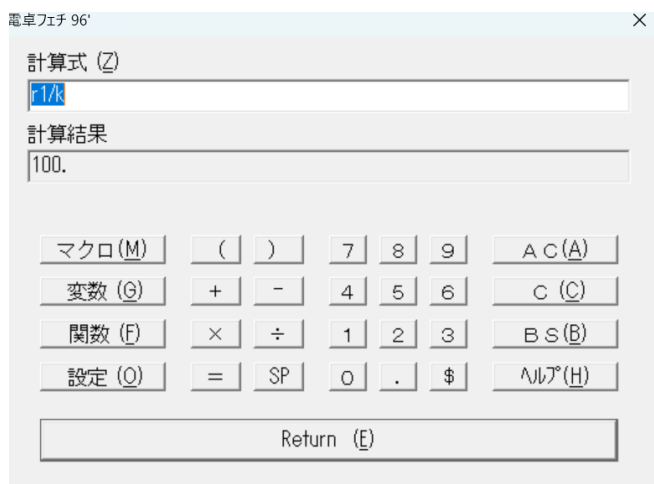
**c=56.0002 p;P0=6.2832 K;p1=39.4784 Meg;p4=39.4784 Meg;\$1p1c**

R1= 947.351 K、C1= 0.503999 n、C2= 56.0002 p と確認できます。

R1 を 100K に変更したいときは、次のように入力して実行してください。

**z=100 k;P0=6.2832 K;p1=39.4784 Meg;p4=39.4784 Meg;\$1p1z**

素子値を確認すると、R1=R2=R3=100 k, C1= 4.774637128 n, C2= 0.5305179541n に変わることが分かります。



R1=100 K、C1= 4.77464 n、C2= 0.530518 n になることが分かります。

「設定」で「小数点以下の桁数」を 0 から 15 の範囲で変更出来ます。デフォルトは 6 です。

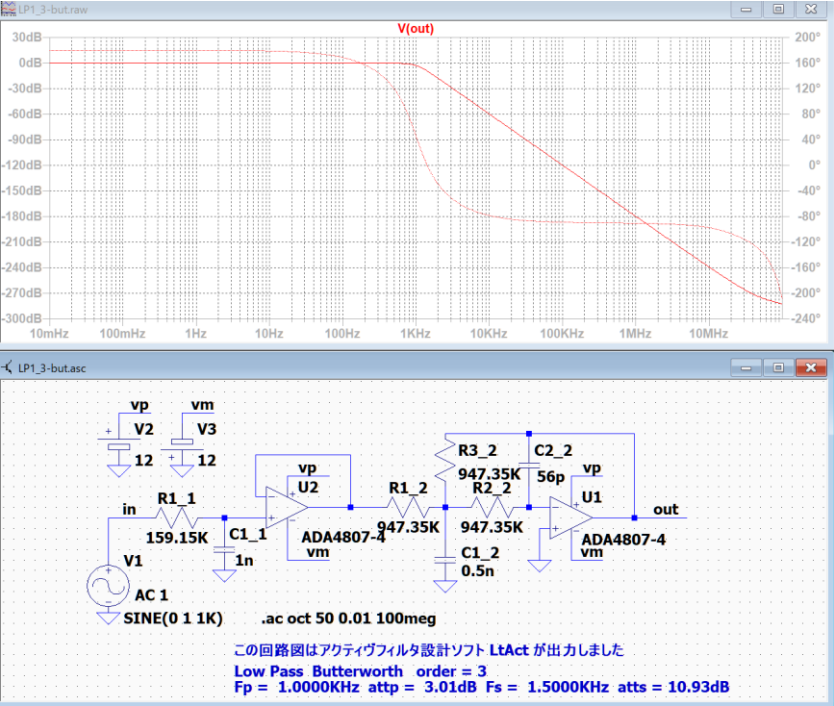
15 桁に設定して c2/n を確認すると、c2= 0.530517954121747 n と表示されます。

3 桁に設定して c2/n を確認すると、c2= 0.531 n (小数点以下 4 桁目を四捨五入) と表示されます。

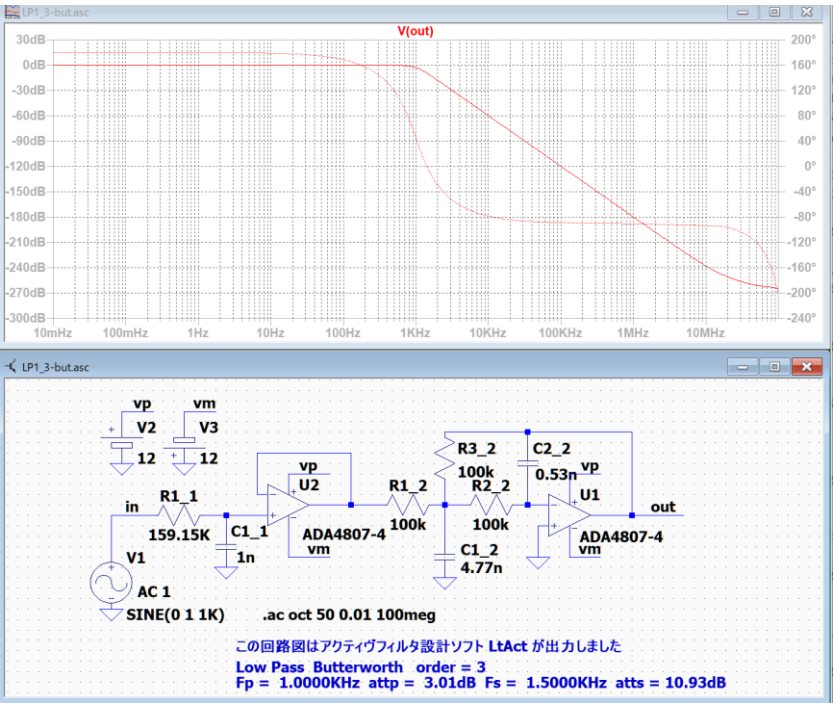
R, C の素子値の場合には、「小数点以下の桁数」を 3 または 4 に設定すれば良いと思います。

R1 の値を変更する前後の回路図を周波数特性を比較します。

変更前 R1=947.35 K



変更後 R1=100 K



このように周波数特性を変えずに、希望する素子値に変更することができます。

### 電卓への入力方法

入力する計算式が長くて電卓の入力画面で直接入力するのが困難な場合には、テキストエディタで計算式を入力して内容を確認してから、コントロール+C でコピーして電卓の入力行にコントロール+V で貼り付けると便利だと思います。

#### 入力したい計算式

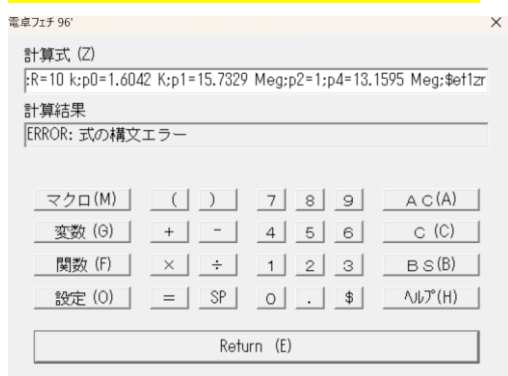
**z=252.1135 k;R=10 k;p0=1.6042 K;p1=15.7329 Meg;p2=1;p4=13.1595 Meg;\$et1zr**

計算式を選択してコントロール+C でコピーします。

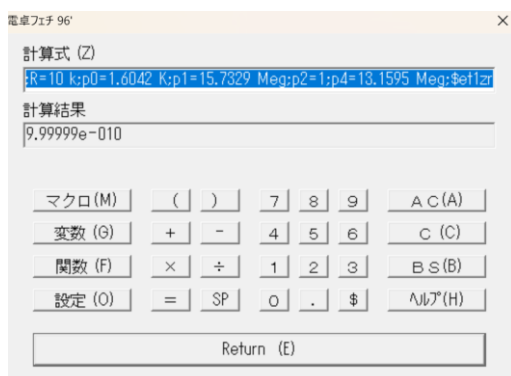
電卓の画面でリターンキーを押して、入力の受付状態にする。



コントロール+V で計算式を貼り付ける。



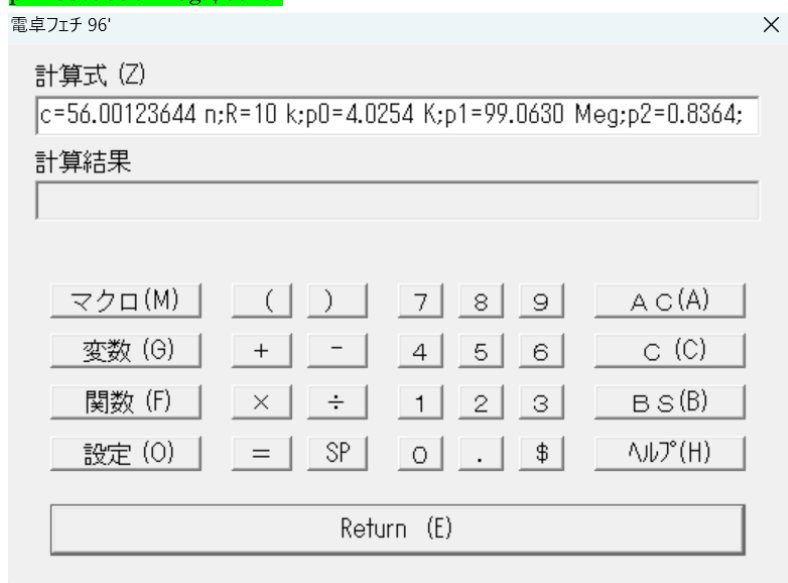
計算の実行 リターンキーを押します。



本文の入力例をコピーして電卓にペーストすることも出来ますが、入力例が複数行になっている場合には電卓の入力行にペーストしても最初の1行しかペーストされません。

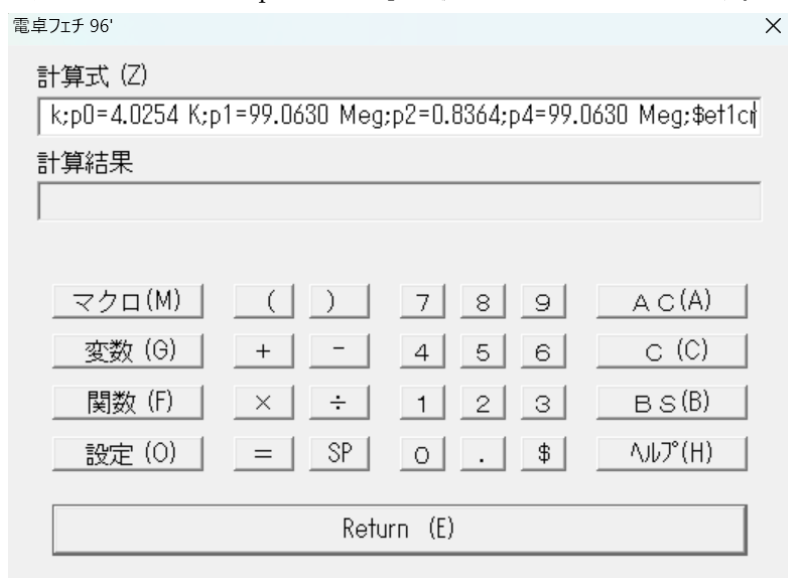
次の入力例を2行全体をコピーして、電卓にペーストしてみます。

c=56.00123644 n;R=10 k;p0=4.0254 K;p1=99.0630 Meg;p2=0.8364;  
p4=99.0630 Meg;\$et1cr



電卓の入力行には、1行目だけがペーストされたことが分かります。

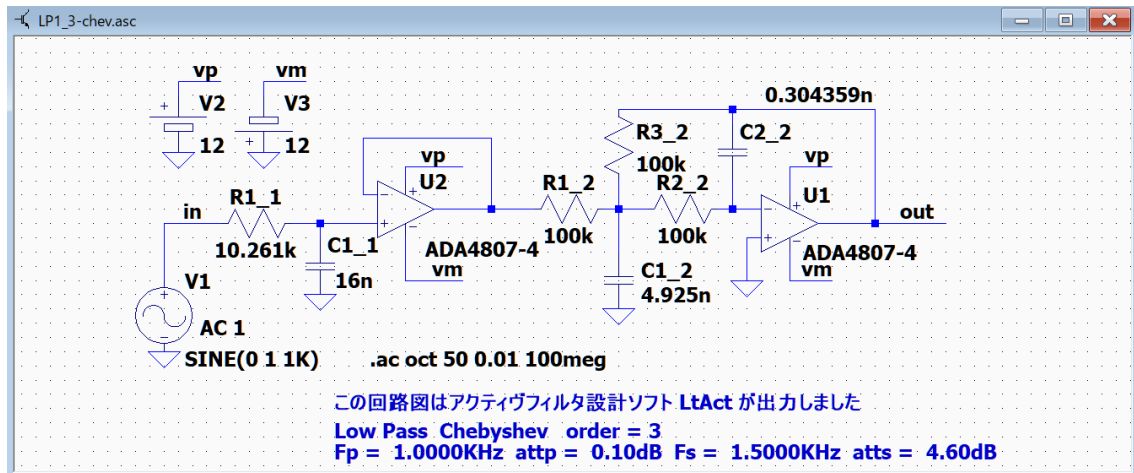
2行目をコピーして「p2=0.8364;」の後ろに追加ペーストします。



このように複数行の入力例をコピー&ペーストする場合は、1行ずつコピーして最後尾に追加ペーストして下さい。

## LP1 と LP2 の計算マクロと入力例

### lp1 の計算マクロ (1 次のローパスフィルタ)



slpz Z=R1 を与えて lp1 を計算する。 バターワースとチェビシェフの 1 次フィルタ

$$r1=z;c1=1/(p0*z)$$

z=10.2611 K;P0=6.0910 K;p2=6.0910 k;\$slpz → C1 = 16 n が得られます。

**注意:** z=10.2611 K のように数字と単位の上にスペースを入れる。

単位の上にスペースを入れない。マクロも同様。

「電卓プログラム Dt\_.exe」はスペースを「\*」と認識するので構文エラーになる。

slpc C(C1)を与えて lp1 を計算する バターワースとチェビシェフの 1 次フィルタ

$$c1=c;r1=1/(p0*z)$$

c=16 n; P0=6.0910 K;p2=6.0910 k;\$slpc → R1= 10.261 k が得られます。

### LP1 の計算マクロ (2 次のローパスフィルタ)

lp1z Z=R1 を与えて Lp1 を計算する。 バターワースとチェビシェフ用

$$wc=\sqrt{p4};Q=wc/p0;mm=9*Q*Q;kk=1;FSF=\sqrt{mm*kk}*wc;R1=z;R3=z;$$

$$R2=kk*z;c=1/(z*FSF);c1=mm*c;C2=c;$$

z=100 k;p0=6.0910 K;p1=66.7086 Meg;p4=66.7086 Meg;\$lp1z

→ R1=R2=R3=100 K;C1= 4.9253 n;C2= 0.304359 n

lp1c C=C2 を与えて LP1 を計算する バターワースとチェビシェフ用

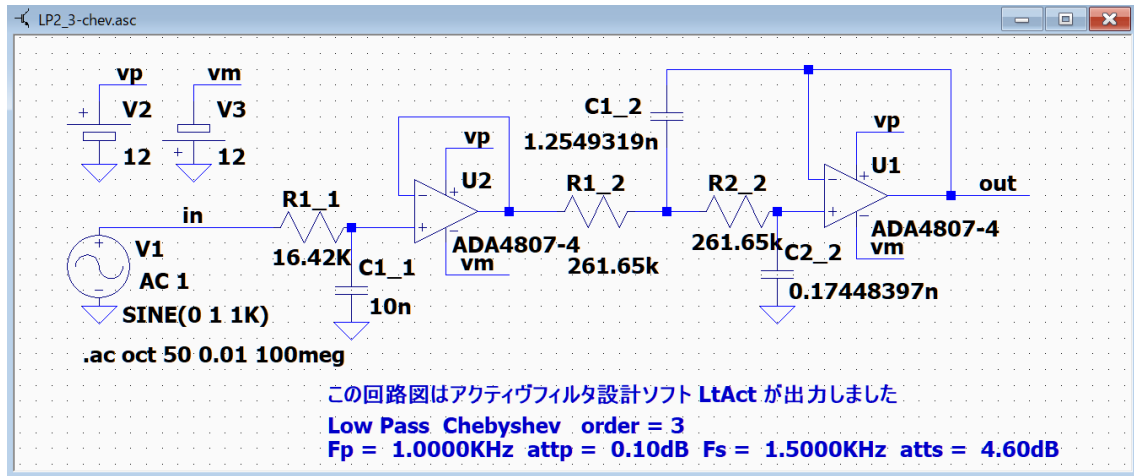
$$wc=\sqrt{p4};Q=wc/p0;mm=9*Q*Q;kk=1;FSF=\sqrt{mm*kk}*wc;z=1/(c*FSF);$$

$$R1=z;R3=z;R2=kk*z;c1=mm*c;c2=c;$$

c=30 p;p0=6.0910 K;p1=66.7086 Meg;p4=66.7086 Meg;\$lp1c

→ R1=R2=R3= 1.01453 meg; C1= 0.485477 n;C2= 30 p

### LP2 の計算マクロ (2 次のローパスフィルタ)



lp2z Z=R1 を与えて LP2 を計算する。 バターワースとチェビシェフ用

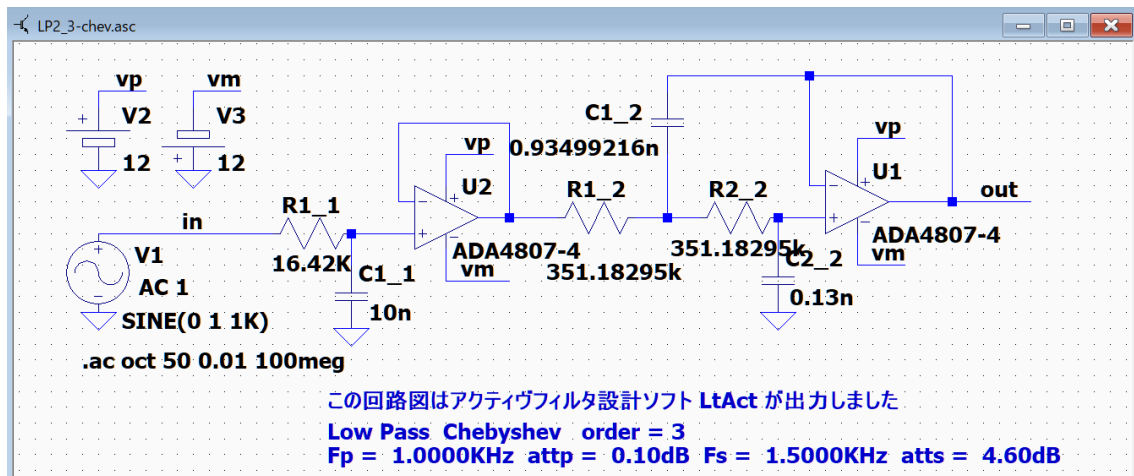
$wc = \sqrt{p4}$ ;  $Q = wc/p0$ ;  $mm = 4 * Q * Q$ ;  $kk = 1$ ;  $FSF = \sqrt{mm * kk} * wc$ ;  $R1 = z$ ;  $R2 = kk * z$ ;  
 $c = 1 / (z * FSF)$ ;  $c1 = mm * c$ ;  $C2 = c$

$z = 261.6503 \text{ k}$ ;  $P0 = 6.0910 \text{ K}$ ;  $p1 = 66.7086 \text{ Meg}$ ;  $p4 = 66.7086 \text{ Meg}$ ; \$lp2z

→ R1=R2= 261.65 K; C1= 1.25493 n; C2= 0.174484 n

$z = 100 \text{ k}$ ;  $P0 = 6.0910 \text{ K}$ ;  $p1 = 66.7086 \text{ Meg}$ ;  $p4 = 66.7086 \text{ Meg}$ ; \$lp2z

→ R1=R2= 100 K; C1= 3.2835331 n; C2= 0.45653784 n



lp2c C=C2 を与えて LP2 を計算する。 バターワースとチェビシェフ用

$wc = \sqrt{p4}$ ;  $Q = wc/p0$ ;  $mm = 4 * Q * Q$ ;  $kk = 1$ ;  $FSF = \sqrt{mm * kk} * wc$ ;  $z = 1 / (c * FSF)$ ;  
 $R1 = z$ ;  $R2 = z$ ;  $c1 = mm * c$ ;  $C2 = c$

$c = 0.1300 \text{ n}$ ;  $P0 = 6.0910 \text{ K}$ ;  $p1 = 66.7086 \text{ Meg}$ ;  $p4 = 66.7086 \text{ Meg}$ ; \$lp2c

→ R1=R2= 351.18295 K; C1= 0.93499216 n; C2= 0.13 n

### 逆チェビシェフ 伝達関数

逆チェビシェフローパスフィルタの次数 $m$ 、周波数  $f_c$  における減衰量 $\text{atts}(\text{db})$ とすると、

$l = \text{ceil}((\text{double})(m-1)/2) - 1$  として

逆チェビシェフローパスフィルタの伝達関数は

$m$ が奇数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{\omega_d}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2 (r_k^2 s^2 + 1)}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-42)$$

$m$ が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2 (r_k^2 s^2 + 1)}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-43)$$

(1-42)、(1-43) において

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{10^{\text{atts}/10} - 1}}$$

$$a_k = \frac{\pi(2k+1)}{2m} \quad k = 0, \dots, l$$

$$d = \frac{1}{m} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)$$

$$p_k = \frac{\sin(a_k) \sinh(d)}{1 + \sinh^2(d) - \sin^2(a_k)}$$

$$q_k = \frac{\cos(a_k) \cosh(d)}{\cosh^2(d) + \cos^2(a_k) - 1}$$

$$r_k = \frac{\cos(a_k)}{\omega_c}$$

$$\omega_{ck} = \omega_c \sqrt{p_k^2 + q_k^2}$$

$$Q_k = \frac{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}{2p_k}$$

$$\omega_d = \omega_c / \sinh(d)$$

$$\omega_c = 2\pi f_c \quad (1-44)$$



### 逆チェビシェフ R,C 素子値の決定

逆チェビシェフローパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

1 次のフィルタ lp1 の後に、2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

逆チェビシェフの伝達関数は次式を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{\omega_d}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2 (r_k^2 s^2 + 1)}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-42)$$

### 1 次の回路の素子値決定

1 次の回路は次式を使用する

$$H_1(\omega_p, s) = \frac{(1/C_1 R_1)}{s + (1/C_1 R_1)} \quad (2-1)$$

(2-1) と (1-42) の 1 次の項を比較して、

$$\omega_d = \frac{1}{C_1 R_1} \quad (2-9)$$

ここで、 $\omega_d = 1, C_1 = 1$  とすると、

$$R_1 = \frac{1}{\omega_d C_1} = \frac{1}{1 \cdot 1} = 1$$

$$\text{従って、} C_1 = R_1 = 1 \quad (2-10)$$

カットオフ周波数を  $f_c$ , R の値を Z とすると、(1-44) より

$$\omega_c = 2\pi f_c, \omega_d = \omega_c / \sinh(d), FSF = \omega_d$$

$$R_1 = Z \quad (2-11)$$

$$C_1 = 1/FSF/Z$$

## 2 次の回路の素子値決定

### et1 を使用する時

伝達関数は (1-42) の2次の部分を使用する

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{\omega_d}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2 (r_k^2 s^2 + 1)}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-42)$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)}s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

(2-5) を (1-42) の2次式の部分と比較し易いように変形します。

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_4} \frac{\frac{1}{C_b^2 R_b^2} \left( \frac{C_b^2 R_b^2 R_4}{R_2} s^2 + 1 \right)}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)}s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-31)$$

(2-31) と (1-42) より、

$$\omega_{ck}^2 = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \quad (2-33)$$

$$r_k^2 = \frac{C_b^2 R_b^2 R_4}{R_2} = \frac{R_4}{R_2 \omega_{ck}^2} \quad (2-34)$$

$$\frac{\omega_{ck}}{Q_k} = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3\omega_{ck}}{R_1 + R_4} \quad (2-35)$$

(2-33) と (2-35) より、

$$R_1 = \frac{R_4}{3Q_k - 1} \left( Q_k > \frac{1}{3} \right) \quad (2-36)$$

(2-34) より、

$$R_2 = \frac{R_4}{r_k^2 \omega_{ck}^2} \quad (2-37)$$

(2-33) より、

$$FSF = \omega_{ck}, C_b = 1/Z/FSF, R_b = Z, R_3 = R_4 \quad (2-38)$$

### et2 を使用する時

伝達関数は (1-42) の2次の部分を使用する

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{\omega_d}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{\omega_{ck}^2 (r_k^2 s^2 + 1)}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (1-42)$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)}s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

(2-6) を (1-42) の2次式の部分と比較し易いように変形します。

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kr} \frac{R_4}{R_6} \frac{\frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)} (C_b^2 R_b^2 s^2 + 1)}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)}s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)}} \quad (2-32)$$

(2-32) と (1-42) より、

$$r_k^2 = C_b^2 R_b^2 \quad (2-39)$$

$$\omega_{ck}^2 = \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)} = \frac{1+kr}{r_k^2(1+kd)} \quad (2-40)$$

$$\frac{\omega_{ck}}{Q_k} = \frac{kd+kr+4(1-kk)}{C_b R_b(1+kd)} = \frac{kd+kr+4(1-kk)}{r_k(1+kd)} \quad (2-41)$$

$$G = \frac{kk}{1+kr} \frac{R_4}{R_6} = 1 \quad (2-42)$$

(2-40) より、

$$kd = \frac{1+kr}{r_k^2 \omega_{ck}^2} - 1 > \frac{1}{r_k^2 \omega_{ck}^2} - 1 > 0 \dots \dots \Theta kr > 0 \quad (2-43)$$

まず、 $kd$  を (2-43) を満足する値に設定します。このとき、(2-40) より、

$$kr = r_k^2 \omega_{ck}^2 (1+kd) - 1 \quad (2-44)$$

(2-41) より、

$$kd + kr + 4(1 - kk) = \frac{r_k \omega_{ck}(1 + kd)}{Q_k}$$

$$\therefore kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{r_k \omega_{ck}(1 + kd)}{Q_k}}{4} \quad (2-45)$$

(2-45) に (2-44) を代入して、 $kk > 1, r_k \omega_{ck} < 1$  を適用すると

$$kd > \frac{Q_k(1 - r_k^2 \omega_{ck}^2) + r_k \omega_{ck}}{Q_k(1 + r_k^2 \omega_{ck}^2) - r_k \omega_{ck}}$$

(2-42) より、 $R_4 = \frac{1 + kd}{kk} R_6$  (2-46)

従って、(2-39) より、変換係数を  $FSF = 1/r_k$  とすると、

$$C_b = 1/Z/FSF, R_b = Z, R_1 = R_b/2, R_2 = 2R_b/kr$$

$$R_3 = (kk - 1)R_5, R_4 = \frac{1 + kr}{kk} R_6 \quad (2-47)$$

$$C_1 = 2C_b, C_2 = kdC_b/2$$

ただし、 $kd > \max[\frac{1}{r_k^2 \omega_{ck}^2} - 1, \frac{Q_k(1 - r_k^2 \omega_{ck}^2) + r_k \omega_{ck}}{Q_k(1 + r_k^2 \omega_{ck}^2) - r_k \omega_{ck}}]$  を満足する  $kd$  に対して、

$$kr = r_k^2 \omega_{ck}^2 (1 + kd) - 1 \quad (2-44)$$

$$kk = \{kd + kr + 4 - r_k \omega_{ck}(1 + kd)/Q_k\}/4 \quad (2-45)$$

### 楕円関数 伝達関数

楕円関数ローパスフィルタの次数 $m$ 、カットオフ周波数  $f_p$ 、通過域のリプル $\text{attp}(\text{db})$ 、周波数  $f_s$  において最低減衰量 $\text{atts}(\text{db})$ を確保する場合、

$$x_L = f_s / f_p = 1/k, \quad \omega_p = 2\pi f_p, \quad K = K(k) \text{ として、}$$

$m$ が奇数の時

$$x_{z\nu} = \text{sn}(2\nu K/m) \quad (1-127a)$$

$m$ が偶数の時

$$x_{z\nu} = \text{sn}[(2\nu-1)K/m] \quad (1-127b)$$

$$x_\nu = \frac{x_L}{x_{z\nu}} \quad (1-128)$$

$$C_1 = \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} \frac{1-x_\nu^2}{1-x_{z\nu}^2}, \quad C_2 = \prod_{\nu=1}^{m/2} \frac{1-x_\nu^2}{1-x_{z\nu}^2} \quad (1-129)$$

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\text{attp}/10} - 1}, \quad L = \sqrt{(10^{\text{atts}/10} - 1)/(10^{\text{attp}/10} - 1)}, \quad m = \frac{K(k)K'(L^{-1})}{K'(k)K(L^{-1})} \text{ (切り上げ)}$$

とする時、 $m$ が奇数の時

$$H_m(\omega_p, s) = \frac{\sigma}{s + \sigma} \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} \frac{(s^2 + (x_\nu \omega_p)^2)}{(m-1)/2 \sqrt{C_H \sigma} (s^2 + p_\nu s + q_\nu)} \quad (1-140)$$

ただし、 $C_H$ ,  $\sigma$ ,  $p_\nu$ ,  $q_\nu$  は次式を満たすものとします。

$$\begin{aligned} & \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} [s^2 + x_\nu^2 \omega_p^2]^2 + \varepsilon^2 C_1^2 \left( \frac{s}{\omega_p} \right)^2 \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} [s^2 + x_{z\nu}^2 \omega_p^2]^2 \\ & = -C_H^2 (s^2 - \sigma^2) \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} [s^4 + (2q_\nu - p_\nu^2) s^2 + q_\nu^2] \end{aligned}$$

$m$ が偶数の時

$$H_m(\omega_p, s) = \prod_{\nu=1}^{m/2} \frac{(s^2 + (x_\nu \omega_p)^2)}{m/2 \sqrt{C_H} (s^2 + p_\nu s + q_\nu)} \quad (1-142)$$

ただし、 $C_H$ ,  $p_\nu$ ,  $q_\nu$  は次式を満たすものとします。

$$\prod_{v=1}^{m/2} \left[ s^2 + x_v^2 \omega_p^2 \right]^2 + \varepsilon^2 C_2^2 \prod_{v=1}^{m/2} \left[ s^2 + x_{zv}^2 \omega_p^2 \right]^2$$

$$= C_H^2 \prod_{v=1}^{m/2} \left[ s^4 + (2q_v - p_v^2) s^2 + q_v^2 \right]$$

### 楕円関数 R,C 素子値の決定

楕円関数ローパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

1 次のフィルタ lp1 の後に、2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

楕円関数の伝達関数は次式を使用する。

m が奇数の時

$$H_m(\omega_p, s) = \frac{\sigma}{s + \sigma} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{\left( s^2 + (x_v \omega_p)^2 \right)}{(m-1)/2 \sqrt{C_H \sigma} \left( \left[ s^2 + p_v s + q_v \right] \right)} \quad (1-140)$$

m が偶数の時

$$H_m(\omega_p, s) = \prod_{v=1}^{m/2} \frac{\left( s^2 + (x_v \omega_p)^2 \right)}{m/2 \sqrt{C_H} \left( \left[ s^2 + p_v s + q_v \right] \right)} \quad (1-142)$$

### 1 次の回路の素子値決定

1 次の回路は次式を使用する

$$H_1(\omega_p, s) = \frac{(1/C_1 R_1)}{s + (1/C_1 R_1)} \quad (2-1)$$

(2-1) と (1-140) の 1 次の項を比較して、

$$\sigma = \frac{1}{C_1 R_1} \quad (2-9)$$

$$FSF = \sigma, R_1 = Z, C_1 = 1/Z / FSF \quad (2-48)$$

## 2 次の回路の素子値決定

### et1 を使用する時

伝達関数は (1-1 4 0)、(1-1 4 2) の 2 次の部分を使用する

$$H_m(\omega_p, s) = \prod_{v=1}^{m/2} \frac{(s^2 + (x_v \omega_p)^2)}{\sqrt[m/2]{C_H} \left( [s^2 + p_v s + q_v] \right)} \quad (1-1 4 2)$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

(2-5) と (1-1 4 2) より、

$$q_v = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \quad (2-4 9)$$

$$\omega_{0v}^2 = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} q_v \quad (2-5 0)$$

$$p_v = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3\sqrt{q_v} R_1}{(R_1 + R_4)} \quad (2-5 1)$$

(2-4 9) より、

$$FSF = \sqrt{q_v} \text{ として、 } C_b = 1/Z/FSF, R_b = Z \quad (2-5 2)$$

(2-5 0) より、 $\omega_{0v} = x_v \omega_p$  として、

$$R_2 = \frac{\omega_{0v}^2}{q_v} R_4 \quad (2-5 3)$$

$$G^{-1} = {}^{(m-1)/2}\sqrt{C_H} \sigma (m = odd) \quad G^{-1} = {}^{m/2}\sqrt{C_H} (m = even) \text{ として、}$$

$$R_3 = G R_2$$

$$(2-5 1) \text{ より、 } R_1 = \frac{p_v}{3\sqrt{q_v} - p_v} R_4 \quad (2-5 4)$$

### et2 を使用する時

伝達関数は (1-1 4 0)、(1-1 4 2) の 2 次の部分を使用する

$$H_m(\omega_p, s) = \prod_{v=1}^{m/2} \frac{(s^2 + (x_v \omega_p)^2)}{\sqrt[m/2]{C_H} \left( [s^2 + p_v s + q_v] \right)} \quad (1-1 4 2)$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

(2-6) と (1-1 4 2) より、 $\omega_{0v} = x_v \omega_p$  として、

$$\omega_{0v} = \frac{1}{C_b R_b} \quad (2-5 5)$$

$$q_v = \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{0v}^2 \quad (2-5 6)$$

$$p_v = \frac{kd+kr+4(1-kk)}{(1+kd)} \omega_{0v} \quad (2-5 7)$$

$$G^{-1} = {}^{(m-1)/2}\sqrt{C_H} \sigma (m = odd) \quad G^{-1} = {}^{m/2}\sqrt{C_H} (m = even) \text{ として、}$$

$$G = \frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \quad (2-5 8)$$

(2-5 6) より、

$$kd = \frac{\omega_{0v}^2}{q_v} (1+kr) - 1 > \frac{\omega_{0v}^2}{q_v} - 1 > 0 \dots \dots \ominus kr > 0 \text{ を満足する } kd \text{ に対して、}$$

$$kr = \frac{q_v}{\omega_{0v}^2} (1+kd) - 1 \quad (2-5 9)$$

(2-5 7) より、

$$kk = \frac{kd+kr+4}{4} - \frac{p_v(1+kd)}{4\omega_{0v}} \quad (2-6 0)$$

(2-6 0) に (2-5 9) を代入して、 $kk > 1$ を適用すると、



$$kd > \frac{\omega_{0v}^2 + p_v \omega_{0v} - q_v}{\omega_{0v}^2 - p_v \omega_{0v} + q_v}$$

$$(2-58) \text{ より、 } R_4 = \frac{1+kd}{kk} GR_6 \quad (2-61)$$

従つて、 $FSF = \omega_{0v} = x_v \omega_p$  として、 $kd > \max[\frac{\omega_{0v}^2}{q_v} - 1, \frac{\omega_{0v}^2 + p_v \omega_{0v} - q_v}{\omega_{0v}^2 - p_v \omega_{0v} + q_v}]$  に対して、

$$C_b = 1/Z/FSF, R_b = Z, R_1 = R_b/2, R_2 = 2R_b/kr$$

$$R_3 = (kk-1)R_5, R_4 = \frac{1+kd}{kk} GR_6$$

$$C_1 = 2C_b, C_2 = kdC_b/2$$

ただし、

$$kr = \frac{q_v}{\omega_{0v}^2} (1+kd) - 1 \quad (2-59)$$

$$kk = \frac{kd + kr + 4}{4} - \frac{p_v(1+kd)}{4\omega_{0v}} \quad (2-60)$$

# 逆チェビシェフと楕円関数 LP3 と LP4 の計算マクロと入力の場合

**注意:** 基本回路 et1 と et2 は逆チェビシェフまたは楕円関数のローパスフィルタ、ハイパスフィルタ、バンドパスフィルタおよびバンドエリミネーションフィルタに使われます。

伝達関数から素子値に変換するマクロは同じものが利用できます。

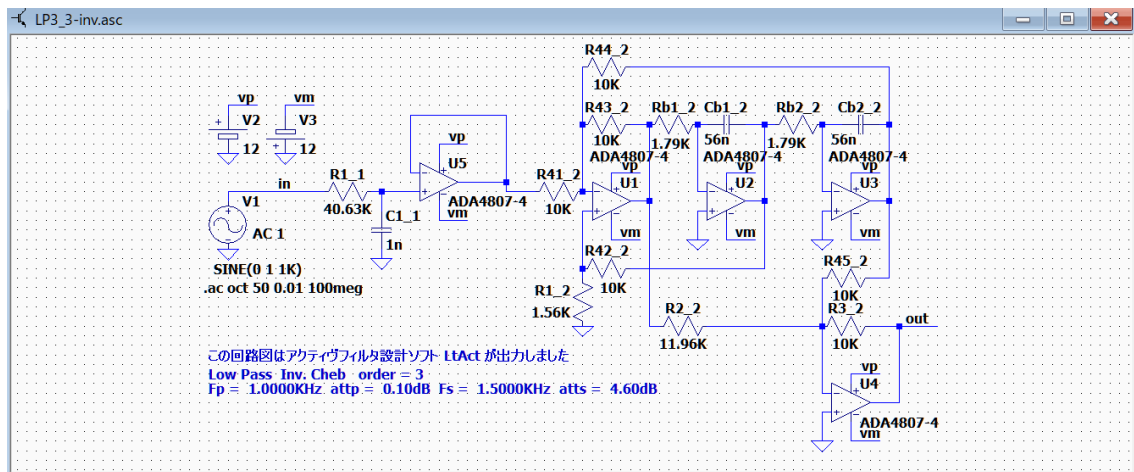
基本回路 et1 を使う場合は、(LP3, HP3, BP3, ET1)

et1zr(Z=Rb と R=R4 を与える)又は et1cr(C=Cb と R=R4 を与える)が利用できます。

基本回路 et2 を使う場合は、(LP4, HP4, BP4, ET2)

et2zkr(Z=Rb と  $Kr=2 \cdot Rb/R2$  を与える)又は et2ckr(C=Cb と  $Kr=2 \cdot Rb/R2$  を与える)が利用できます。

## et1 使用 逆チェビシェフローパスフィルタ



et1zr Z(Rb)と R(R4)を与えて、LP3 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数

$rb=Z; r4=R; wc=\sqrt{p1}; Q=wc/p0; FSF=wc; r1=R/(3 \cdot Q-1); R3=p4 \cdot R/p1;$

$R2=R3/p2; cb=1/(Z \cdot FSF);$

$z=1.7941 \text{ k}; R=10 \text{ k}; p0=4.0254 \text{ K}; p1=99.0630 \text{ Meg}; p2=0.8364; p4=99.0630 \text{ Meg}; \text{\$et1zr}$

→  $R1=1.56 \text{ k}; R2=11.956 \text{ k}; R3=10 \text{ k}; R4=10 \text{ k}; rb=1.7941 \text{ k}; cb=56.0012 \text{ n}$

et1cr Cb=CZ と R4=R を与えて、LP3 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数

$cb=C; r4=R; wc=\sqrt{p1}; Q=wc/p0; FSF=wc; r1=R/(3 \cdot Q-1); R3=p4 \cdot R/p1;$

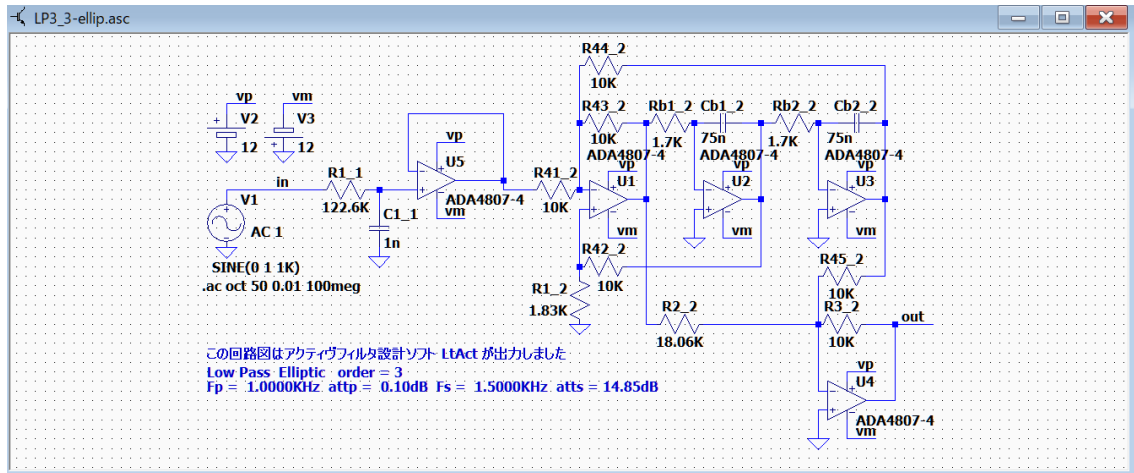
$R2=R3/p2; rb=1/(C \cdot FSF);$

$c=56 \text{ n}; R=10 \text{ k}; p0=4.0254 \text{ K}; p1=99.0630 \text{ Meg}; p2=0.8364; p4=99.0630 \text{ Meg}; \text{\$et1cr}$

→  $R1=1.56 \text{ k}; R2=11.956 \text{ k}; R3=10 \text{ k}; R4=10 \text{ k}; rb=1.79414 \text{ k}; cb=56.0012 \text{ n}$

逆チェビシェフと楕円関数 LP3 と LP4 の計算マクロと入力の場合

et1 使用 楕円関数ローパスフィルタ



et1zr rb=Z と R4=R を与える 逆チェビシェフと楕円関数用

rb=Z;r4=R;wc=sqrt(p1); Q=wc/p0;FSF=wc; r1=R/(3\*Q-1);R3=p4\*R/p1;  
 R2=R3/p2; cb=1/(Z\*FSF);

z=1.7 k;R=10 k;p0=3.6398 K;p1=61.3446 Meg;p2=0.5538;p4=61.3446 Meg;\$et1zr

→ R1= 1.83 k;R2= 18.06 k;R3= 10 k;R4= 10 k;rb=1.7 k;cb= 75.104 n

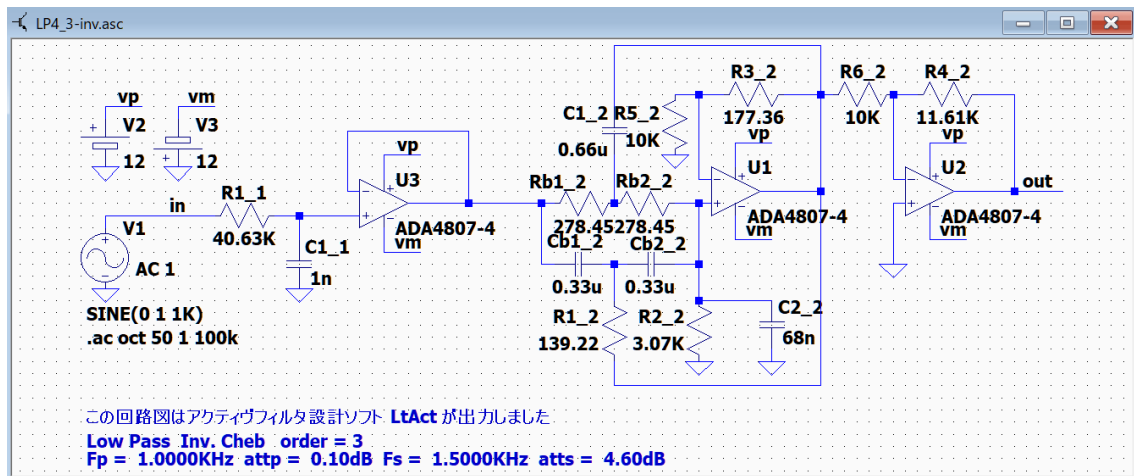
et1cr cb=c と R4=R を与える 逆チェビシェフと楕円関数用

cb=C;r4=R;wc=sqrt(p1); Q=wc/p0;FSF=wc; r1=R/(3\*Q-1);R3=p4\*R/p1;  
 R2=R3/p2; rb=1/(C\*FSF);

c=75 n;R=10 k;p0=3.6398 K;p1=61.3446 Meg;p2=0.5538;p4=61.3446 Meg;\$et1cr

→ R1= 1.833 k;R2= 18.06 k;R3= 10 k;R4= 10 k;rb=1.70236 k;cb=75 n

et2 使用 逆チェビシェフローパスフィルタ



逆チェビシェフと楕円関数 LP3 と LP4 の計算マクロと入力の例

et2zkr Z=rb と  $kr=2Rb/R2$  を与えて、LP4 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数用

$wc=\sqrt{p1}$ ;  $Q=\sqrt{p1}/p0$ ;  $FSF=\sqrt{p1/p2}$ ;  $Rb=Z$ ;  $R2=2*Rb/kr$ ;  $R5=10\text{ k}$ ;  $R6=10\text{ k}$ ;  
 $kd=(1+kr-p2)/p2$ ;  $Cb=1/(Z*FSF)$ ;  $kk=(kd+kr+4\cdot(\sqrt{p2})\cdot(1+kd)/Q))/4$ ;  $R3=(kk-1)*R5$ ;  
 $R4=(1+kr)/kk*R6$ ;  $C1=2*Cb$ ;  $C2=kd*Cb/2$ ;

Z=278.4489;kr= 0.181146212;p0=4.0254 K;p1=99.0630 Meg;p2=0.8364;

p4=99.0630 Meg;\$et2zkr

→ R1= 139.224;R2= 3.07 k;R3=177.472;R4=11.6055 k;rb= 278.449;cb=0.33 u

et2ckr c=cb と  $kr=2*Rb/R2$  を与えて、LP4 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数用

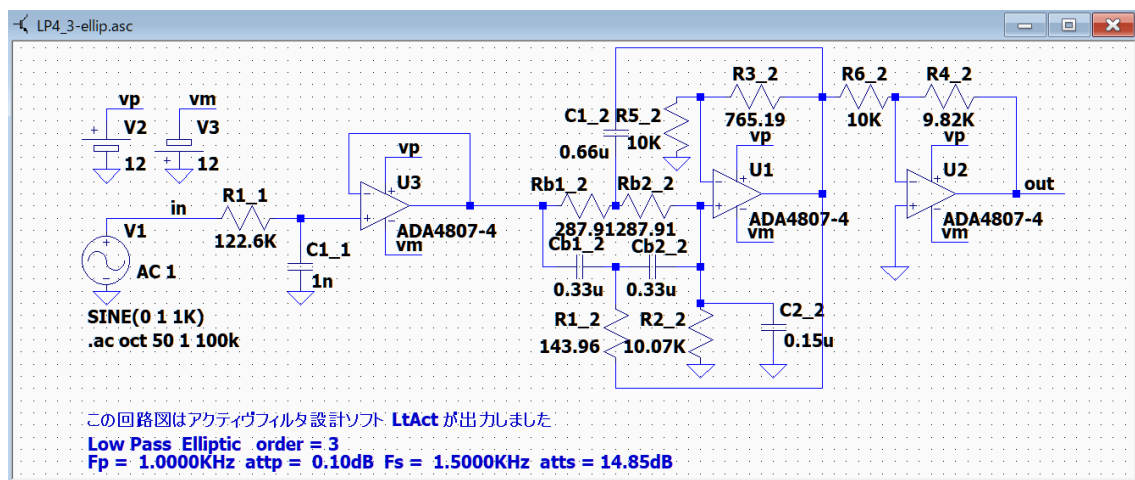
$wc=\sqrt{p1}$ ;  $Q=\sqrt{p1}/p0$ ;  $FSF=\sqrt{p1/p2}$ ;  $Cb=C$ ;  $R=1/(C*FSF)$ ;  $Rb=R$ ;  
 $R2=2*Rb/kr$ ;  $R5=10\text{ k}$ ;  $R6=10\text{ k}$ ;  $kd=(1+kr-p2)/p2$ ;  $kk=(kd+kr+4\cdot(\sqrt{p2})\cdot(1+kd)/Q))/4$ ;  
 $R3=(kk-1)*R5$ ;  $R4=(1+kr)/kk*R6$ ;  $C1=2*Cb$ ;  $C2=kd*Cb/2$ ;

C=0.33 u;kr= 0.181146212;p0=4.0254 K;p1=99.0630 Meg;p2=0.8364;

p4=99.0630 Meg;\$et2ckr

→ R1=139.222;R2= 3.07424 k;R3=177.472;R4=11.6055 k;rb= 278.444;cb= 0.33 u

et2 使用 楕円関数ローパスフィルタ



et2zkr Z=rb と  $kr=2Rb/R2$  を与えて、LP4 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数用

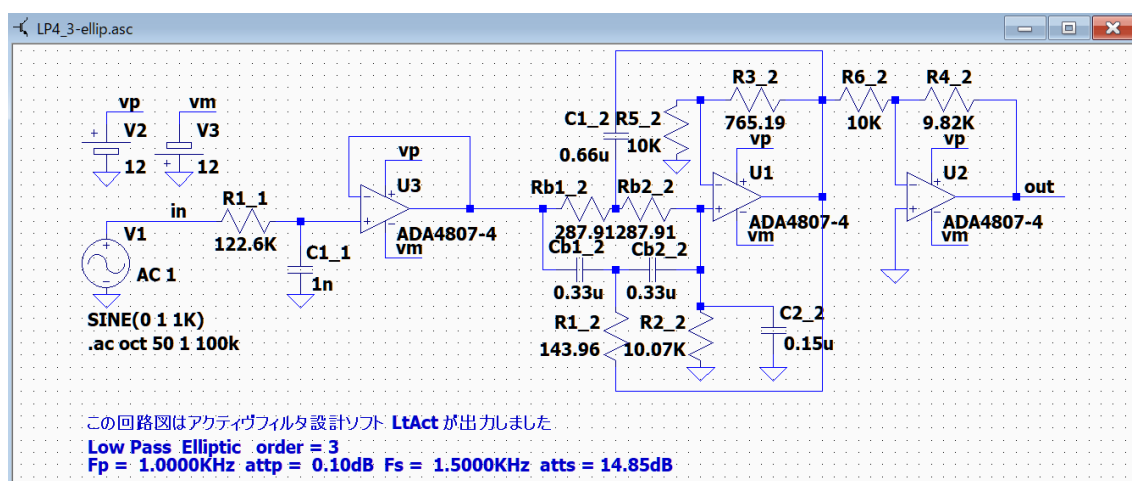
$wc=\sqrt{p1}$ ;  $Q=\sqrt{p1}/p0$ ;  $FSF=\sqrt{p1/p2}$ ;  $Rb=Z$ ;  $R2=2*Rb/kr$ ;  $R5=10\text{ k}$ ;  $R6=10\text{ k}$ ;  
 $kd=(1+kr-p2)/p2$ ;  $Cb=1/(Z*FSF)$ ;  $kk=(kd+kr+4\cdot(\sqrt{p2})\cdot(1+kd)/Q))/4$ ;  $R3=(kk-1)*R5$ ;  
 $R4=(1+kr)/kk*R6$ ;  $C1=2*Cb$ ;  $C2=kd*Cb/2$ ;

Z=287.9130;kr= 0.05719;p0=3.6398 K;p1=61.3446 Meg;p2=0.5538;

p4=61.3446 Meg;\$et2zkr

→ R1= 143.957;R2=10.0686 k;R3= 764.947;R4= 9.82067 k;rb= 287.913;cb= 0.33001 u

逆チェビシェフと楕円関数 LP3 と LP4 の計算マクロと入力の場合



et2ckr c=cb と  $kr=2 \cdot Rb/R2$  を与えて、LP4 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数用

$wc=\sqrt{p1}$ ;  $Q=\sqrt{p1}/p0$ ;  $FSF=\sqrt{p1/p2}$ ;  $Cb=C \cdot R=1/(C \cdot FSF)$ ;  $Rb=R$ ;

$R2=2 \cdot Rb/kr$ ;  $R5=10 \text{ k}$ ;  $R6=10 \text{ k}$ ;  $kd=(1+kr \cdot p2)/p2$ ;  $kk=(kd+kr+4 \cdot (\sqrt{p2} \cdot (1+kd)/Q))/4$ ;

$R3=(kk-1) \cdot R5$ ;  $R4=(1+kr)/kk \cdot R6$ ;  $C1=2 \cdot Cb$ ;  $C2=kd \cdot Cb/2$ ;

$C=0.33 \text{ u}$ ;  $kr=0.05719$ ;  $p0=3.6398 \text{ K}$ ;  $p1=61.3446 \text{ Meg}$ ;  $p2=0.5538$ ;

$p4=61.3446 \text{ Meg}$ ; \$et2ckr

→  $R1=143.961$ ;  $R2=10.069 \text{ k}$ ;  $R3=764.947$ ;  $R4=9.82067 \text{ k}$ ;  $rb=287.922$ ;  $cb=0.33 \text{ u}$

## ハイパスフィルタ

### バターワース 伝達関数

バターワースハイパスフィルタの次数  $m$ 、カットオフ周波数  $f_c$  とするとき、  
 $l = \text{ceil}((\text{double})(m-1)/2)-1$  として、

バターワースハイパスフィルタの伝達関数は  
 $m$  が奇数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s}{s + \omega_c} \prod_{k=0}^l \frac{s^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-5)$$

$m$  が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{s^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-6)$$

(3-5), (3-6) において

$$p_k = \cos\left(\frac{\pi(2k+1+m)}{2m}\right) \dots\dots (0 \leq k \leq l)$$

$$q_k = \sin\left(\frac{\pi(2k+1+m)}{2m}\right) \dots\dots (0 \leq k \leq l)$$

$$\omega_{ck} = \frac{\omega_c}{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}} = \omega_c \quad (3-7)$$

$$Q_k = -\frac{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}{2p_k} = -\frac{1}{2p_k}$$

$$\omega_c = 2\pi f_c$$

### チェビシェフ 伝達関数

チェビシェフハイパスフィルタの次数 $m$ 、カットオフ周波数 $f_c$ 、通過域のリプル $\text{attp}(\text{db})$ とすると、  
 $l = \text{ceil}((\text{double})(m-1)/2) - 1$  として

チェビシェフハイパスフィルタの伝達関数は、

$m$ が奇数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{s^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-10)$$

$m$ が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{s^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-11)$$

(3-10), (3-11) において

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\text{attp}/10} - 1}$$

$$a_k = \frac{\pi(2k+1)}{2m} \quad k = 0, \dots, l$$

$$d = \frac{1}{m} \sinh^{-1}\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)$$

$$\begin{aligned} p_k &= \sin(a_k) \sinh(d) \quad k = 0, \dots, l \\ q_k &= \cos(a_k) \cosh(d) \end{aligned} \quad (3-12)$$

$$\begin{aligned} \omega_{ck} &= \frac{\omega_c}{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}} \\ Q_k &= \frac{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}{2p_k} \end{aligned}$$

$$\omega_d = \frac{\omega_c}{\sinh(d)}$$

$$\omega_c = 2\pi f_c$$

## バターワースとチェビシェフ R,C 素子値の決定

バターワースとチェビシェフのハイパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

1 次のフィルタ hp1 の後に、2 次のフィルタ（HP1 または HP2）が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

2 次のフィルタ（HP1 または HP2）が複数個使用されます。

バターワースの伝達関数は次式を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s}{s + \omega_c} \prod_{k=0}^l \frac{s^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-5)$$

チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{s^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-10)$$

チェビシェフの1次の部分は（3-5）の  $\omega_c$  を  $\omega_d$  に変えれば素子値が決定できます。

チェビシェフの2次の部分はバターワースと同様に素子値が決定できます。

### 1 次の回路の素子値決定

#### バターワースの場合

1 次の回路は次式を使用する

$$H_1(\omega_p, s) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{s}{s + (1/C_1 R_1)} \quad (4-1)$$

1 次の回路部分

（3-5）より hp1 が使用されます。

（4-1）と（3-5）の1次の項を比較して、

$$R_1 = R_2 \quad \omega_c = \frac{1}{C_1 \cdot R_1} \quad (2-9)$$

ここで、 $\omega_c = 1, C_1 = 1$  とすると、

$$R_1 = \frac{1}{\omega_c \cdot C_1} = \frac{1}{1 \cdot 1} = 1$$

従って、 $C_1 = R_1 = 1$  (2-10)

ここで、インピーダンス変換係数 Z 及び周波数変換係数 F S F を導入します。



ZはCおよびRのインピーダンスをZ倍する倍率を表わし、FSFは、カットオフ周波数を $f_c$ とする時、 $FSF = 2\pi f_c$ を表わします。

(2-10)において、カットオフ周波数を $f_c$ 、Rの値をZとすると、

$$\begin{aligned} FSF &= 2\pi f_c \\ R_1 &= Z \\ C_1 &= 1/FSF/Z \end{aligned} \quad (2-11)$$

### チェビシェフの場合

チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{s^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-10)$$

1次の回路は次式を使用する

$$H_1(\omega_p, s) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{s}{s + (1/C_1 R_1)} \quad (4-1)$$

(3-10)の1次の部分と(4-1)より、  
カットオフ周波数を $f_c$ 、Rの値をZとすると、(3-10)より、

$$\begin{aligned} \omega_c &= 2\pi f_c, \omega_d = \omega_c / \sinh(d), FSF = \omega_d \\ R_1 &= R_2 = Z \\ C_1 &= 1/FSF/Z \end{aligned} \quad (4-16)$$

## 2 次の回路の素子値決定

バターワースとチェビシェフの伝達関数は 2 次の部分が共通です。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s}{s + \omega_c} \prod_{k=0}^l \frac{s^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-5)$$

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{s^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-10)$$

### HP1 を使用する場合

HP1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{C_1}{C_3} \frac{s^2}{s^2 + \frac{C_1 + C_2 + C_3}{C_2 C_3 R_2} s + \frac{1}{C_2 C_3 R_1 R_2}} \quad (4-2)$$

利得を 1 とすると、(4-2) と  $C_1 = C, C_2 = m \cdot C, C_3 = C, R_1 = R, R_2 = k \cdot R$  とすると、

$$\omega_{ck}^2 = \frac{1}{C_2 C_3 R_1 R_2} = \frac{1}{mk(CR)^2} \quad (4-8)$$

$$\frac{\omega_{ck}}{Q_k} = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{C_2 C_3 R_2} = \frac{2+m}{mkCR} \quad (4-9)$$

(4-8), (4-9) から、

$$\omega_{ck}^2 = \frac{1}{mk(CR)^2} = \frac{(2+m)^2}{m^2 k^2 (CR)^2} Q_k^2 \quad (4-10)$$

$$\therefore k = \frac{(2+m)^2}{m} Q_k^2$$

(4-10) より、m についての 2 次方程式の判別式  $\geq 0$  より  $k \geq 8 \cdot Q_k^2$  が必要条件となる。しかし、 $m > 0$  なら  $\frac{(2+m)^2}{m} \geq 8$  となるので  $m = 1, k = 9 \cdot Q_k^2$  とする。

従って、変換係数 Z, FSF を適用して、

$$FSF = \sqrt{mk} \omega_{ck}, R_1 = Z, R_2 = kZ, C_1 = C_3 = 1/Z/FSF, C_2 = m/Z/FSF \quad (4-11)$$

上式に於いて、 $\omega_{ck}$  及び  $Q_k$  は (3-12) に従います。

m=1 に設定することで、C1=C2=C3 となり素子値の種類が少なくなる。

### HP2 を使用する場合

バターワースの伝達関数は次式の 2 次の部分を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s}{s + \omega_c} \prod_{k=0}^l \frac{s^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-5)$$

チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{s^2}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-10)$$

HP2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 R_2} s + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4-3)$$

(4-3) と (3-5) より、 $C_1 = mC, C_2 = C, R_1 = R, R_2 = kR$  とすると、

$$\omega_{ck}^2 = \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2} = \frac{1}{mk(CR)^2} \quad (4-12)$$

$$\frac{\omega_{ck}}{Q_k} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 R_2} = \frac{1+m}{mkCR} \quad (4-13)$$

(4-12), (4-13) から、

$$\omega_{ck}^2 = \frac{1}{mk(CR)^2} = \frac{(1+m)^2}{m^2 k^2 (CR)^2} Q_k^2 \quad (4-14)$$

$$\therefore k = \frac{(1+m)^2}{m} Q_k^2$$

(4-14) より、 $m$  についての 2 次方程式の判別式  $\geq 0$  より  $k \geq 4 \cdot Q_k^2$  が必要条件となる。

だが、 $m > 0$  なら  $\frac{(1+m)^2}{m} \geq 4$  となるので  $m = 1, k = 4 \cdot Q_k^2$  とする。

従って、変換係数  $Z$ , FSF を適用して、

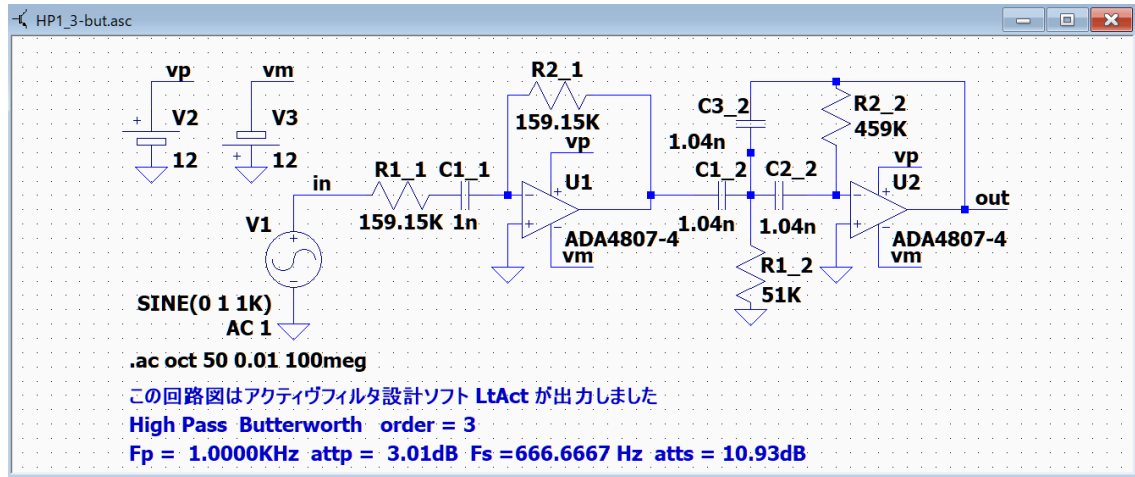
$$FSF = \sqrt{mk} \omega_{ck}, R_1 = Z, R_2 = kZ, C_1 = m/Z/FSF, C_2 = 1/Z/FSF \quad (4-15)$$

上式に於いて、 $\omega_{ck}$  及び  $Q_k$  は (3-7) に従います。

$m=1$  に設定することで、 $C1=C2$  となり素子値の種類が少なくなる。

バターワースとチェビシェフ HP1 と HP2 の計算マクロと入力の場合

hp1 の計算マクロ (1 次のハイパスフィルタ)



hp1z Z=R1 を与える。 m=1 とする。バターワースとチェビシェフ用

$wc = \sqrt{p1}$ ;  $Q = wc/p0$ ;  $mm = 1$ ;  $kk = 9 * Q * Q$ ;  $FSF = \sqrt{mm * kk} * wc$ ;  $r1 = z$ ;  $r2 = kk * z$ ;  
 $c = 1/(z * FSF)$ ;  $c1 = c$ ;  $c2 = c$ ;  $c3 = c$ ;

$z = 51.0000 \text{ K}$ ;  $p0 = 6.2832 \text{ K}$ ;  $p1 = 39.4784 \text{ Meg}$ ; \$hp1z

→ R1=51 k; R2= 458.998 k; C1=C2=C3= 1.04023 n

$z = 154.2857 \text{ K}$ ;  $p0 = 3.6047 \text{ K}$ ;  $p1 = 23.3635 \text{ Meg}$ ; \$hp1z

→ R1= 154.286 k; R2= 2.49671 meg; C1=C2=C3= 0.333338 n

hp1c C=C1 を与える。 m=1 とする。バターワースとチェビシェフ用

$wc = \sqrt{p1}$ ;  $Q = wc/p0$ ;  $mm = 1$ ;  $kk = 9 * Q * Q$ ;  $FSF = \sqrt{mm * kk} * wc$ ;  $c = c$ ;  
 $c1 = c$ ;  $c2 = c$ ;  $c3 = c$ ;  $z = 1/(c * FSF)$ ;  $r1 = z$ ;  $r2 = kk * z$ ;

$c = 1 \text{ n}$ ;  $p0 = 6.2832 \text{ K}$ ;  $p1 = 39.4784 \text{ Meg}$ ; \$hp1c

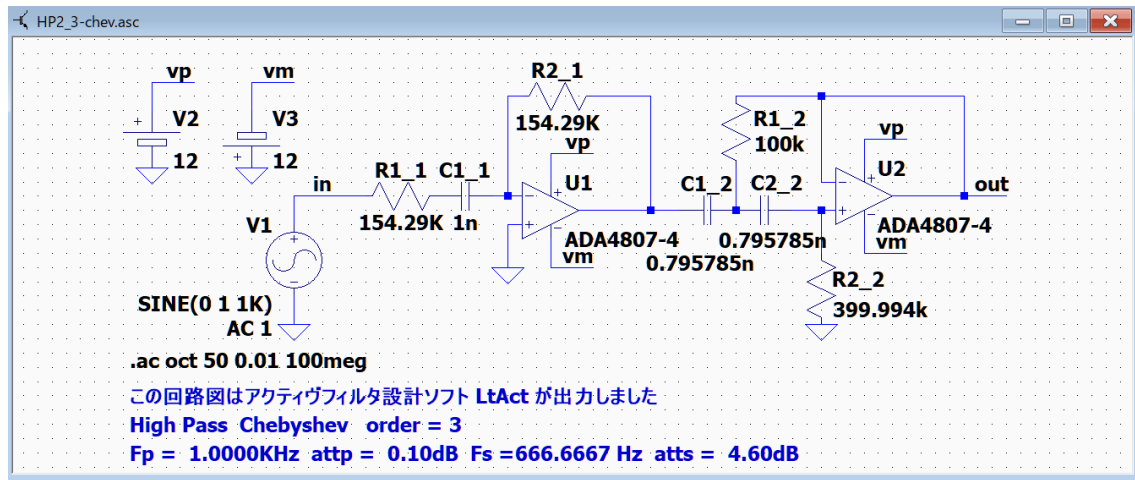
→ R1= 53.0518 k; R2= 477.464 k; C1=C2=C3= 1 n

$c = 10 \text{ n}$ ;  $p0 = 6.2832 \text{ K}$ ;  $p1 = 39.4784 \text{ Meg}$ ; \$hp1c

→ R1= 5.30518 k; R2= 47.7464 k; C1=C2=C3= 10 n

## HP2 の計算マクロ (2 次のハイパスフィルタ)

**\$hp2z** Z=R1 を与える。 m=1 とする。 バターワースとチェビシェフ用



```
wc=sqrt(p1);Q=wc/p0:mm=1;kk=4*Q*Q;FSF=sqrt(mm*kk)*wc;r1=z;r2=kk*z;
c=1/(z*FSF);c1=c;c2= c;c3=c;
```

**z=100 k;p0=6.2832 K;p1=39.478 Meg;\$hp2z;**

→ R1= 100 k;R2= 399.994 k;C1=C2 = 0.795785 n

**z=154.2857 k;p0=3.6047 K;p1=23.3635 Meg;\$hp2z;**

→ R1= 154.286 k;R2= 1.10965 meg;C1=C2 = 0.500006 n

**\$hp2c** C=C2 を与える。 m=1 とする。 バターワースとチェビシェフ用

```
wc=sqrt(p1);Q=wc/p0:mm=1;kk=4*Q*Q;FSF=sqrt(mm*kk)*wc;
c1=c;c2=c;c3=c;z=1/(c*FSF);r1=z;r2=kk*z;
```

**c=1 n;p0=6.2832 K;p1=39.478 Meg;\$hp2c;**

→ R1= 79.5785 k;R2= 318.309 k;C1=C2 = 1 n

**c=1 n;p0=3.6047 K;p1=23.3635 Meg;\$hp2c;**

→ R1= 77.1438 k;R2= 554.831 k;C1=C2 = 1 n

## 逆チェビシェフ 伝達関数

逆チェビシェフハイパスフィルタの次数 $m$ 、周波数 $f_c$ における減衰量 $\text{atts}(\text{db})$ とすると、

$l = \text{ceil}((\text{double})(m-1)/2)-1$ として、

逆チェビシェフハイパスフィルタの伝達関数は、

$m$ が奇数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{(s^2 + r_k^2)}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-14)$$

$m$ が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{(s^2 + r_k^2)}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-15)$$

(3-14)、(3-15)において

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{10^{\text{atts}/10} - 1}}$$

$$a_k = \frac{\pi(2k+1)}{2m} \quad k = 0, \dots, l$$

$$d = \frac{1}{m} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)$$

$$p_k = \frac{\sin(a_k) \sinh(d)}{1 + \sinh^2(d) - \sin^2(a_k)}$$

$$q_k = \frac{\cos(a_k) \cosh(d)}{\cosh^2(d) + \cos^2(a_k) - 1} \quad (3-16)$$

$$r_k = \omega_c \cos(a_k)$$

$$\omega_{ck} = \frac{\omega_c}{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}$$

$$Q_k = \frac{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}{2p_k}$$

$$\omega_d = \omega_c \sinh(d)$$

$$\omega_c = 2\pi f_c$$

## 逆チェビシェフ R,C 素子値の決定

逆チェビシェフハイパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

1 次のフィルタ hp1 の後に、2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

逆チェビシェフの伝達関数は次式を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{(s^2 + r_k^2)}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-14)$$

### 1 次の回路の素子値決定

1 次の回路は次式を使用する

$$H_1(\omega_p, s) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{s}{s + (1/C_1 R_1)} \quad (4-1)$$

(4-1) と (3-14) の 1 次の項を比較して、

$$R_1 = R_2 \quad \omega_d = \frac{1}{C_1 R_1} \quad (2-9)$$

ここで、 $\omega_d = 1, C_1 = 1$  とすると、

$$R_1 = \frac{1}{\omega_d C_1} = \frac{1}{1 \cdot 1} = 1$$

$$\text{従って、} C_1 = R_1 = 1 \quad (2-10)$$

カットオフ周波数を  $f_c$ , R の値を Z とすると、(1-44) より

$$\omega_c = 2\pi f_c, \omega_d = \omega_c / \sinh(d), FSF = \omega_d$$

$$R_1 = Z \quad (2-11)$$

$$C_1 = 1 / FSF / Z$$

## 2 次の回路の素子値決定

伝達関数は (3-14) の2次の部分を使用する

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{(s^2 + r_k^2)}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-14)$$

et1 を使用する時の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)}s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

(2-5) と (3-14) より、 $R_3 = R_2$

$$\omega_{ck}^2 = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \quad (2-33)$$

$$r_k^2 = \frac{C_b^2 R_b^2 R_4}{R_2} = \frac{R_4}{R_2 \omega_{ck}^2} \quad (2-34)$$

$$\frac{\omega_{ck}}{Q_k} = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} \quad (2-35)$$

(2-33) と (2-35) より、

$$9R_1^2 Q_k^2 = (R_1 + R_4)^2 \quad (2-36)$$

$$\therefore R_1 = \frac{R_4}{3Q_k - 1} \quad \left( Q_k > \frac{1}{3} \right)$$

(2-34) より、

$$R_2 = \frac{R_4}{r_k^2 \omega_{ck}^2} \quad (2-37)$$

(2-33) より、

$$FSF = \omega_{ck}, C_b = 1/Z/FSF, R_b = Z, R_3 = R_4 \quad (2-38)$$



et2 を使用する時の伝達関数は、

伝達関数は (3-14) の2次の部分を使用する

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s}{s + \omega_d} \prod_{k=0}^l \frac{(s^2 + r_k^2)}{s^2 + (\omega_{ck}/Q_k)s + \omega_{ck}^2} \quad (3-14)$$

Et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)}s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

(2-6) と (3-14) より、

$$r_k^2 = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \quad (4-24)$$

$$\omega_{ck}^2 = \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)} = \frac{1+kr}{1+kd} r_k^2 \quad (4-25)$$

$$\frac{\omega_{ck}}{Q_k} = \frac{kd+kr+4(1-kk)}{C_b R_b(1+kd)} = \frac{kd+kr+4(1-kk)}{1+kd} r_k \quad (4-26)$$

$$G = \frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = 1 \quad (4-27)$$

(4-25) より、

$$kr = \left(\frac{\omega_{ck}}{r_k}\right)^2 (1+kd) - 1 > \left(\frac{\omega_{ck}}{r_k}\right)^2 - 1 > 0 \dots \dots \ominus kd > 0 \quad (4-28)$$

まず、 $kr$  を (4-28) を満足する値に設定します。

このとき、(4-25) より、

$$kd = \left(\frac{r_k}{\omega_{ck}}\right)^2 (1+kr) - 1 \quad (4-29)$$

(4-26) より、

$$kd + kr + 4(1 - kk) = \frac{\omega_{ck}(1 + kd)}{r_k Q_k}$$

$$\therefore kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{\omega_{ck}(1 + kd)}{r_k Q_k}}{4} > 1 \quad (4-30)$$

$$\therefore kr > \frac{Q_k(\omega_{ck}^2 - r_k^2) + r_k \omega_{ck}}{Q_k(\omega_{ck}^2 + r_k^2) - r_k \omega_{ck}}$$

$$(4-27) \text{ より、 } R_4 = \frac{1 + kd}{kk} R_6 \quad (2-46)$$

従って、(4-24) より、変換係数を  $FSF = r_k$  とすると、

$$FSF = r_k, R_b = Z, C_b = 1/Z/FSF, R_1 = Z/2$$

$$R_2 = 2Z/kr, R_3 = (kk - 1)R_5, R_4 = \frac{1 + kd}{kk} R_6 \quad (2-47)$$

$$C_1 = 2C_b, C_2 = kdC_b/2$$

ただし、 $kr > \max\left[\left(\frac{\omega_{ck}}{r_k}\right)^2 - 1, \frac{Q_k(\omega_{ck}^2 - r_k^2) + r_k \omega_{ck}}{Q_k(\omega_{ck}^2 + r_k^2) - r_k \omega_{ck}}\right]$  を満足する  $kr$  に対して、

$$kd = \left(\frac{r_k}{\omega_{ck}}\right)^2 (1 + kr) - 1 \quad (4-29)$$

$$kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{\omega_{ck}(1 + kd)}{r_k Q_k}}{4} \quad (4-30)$$

R5=R6= 10 K

## 楕円関数 伝達関数

楕円関数ハイパスフィルタの次数 $m$ （未知）、カットオフ周波数 $f_p$ 、通過域のリプル $\text{attp}(\text{db})$ 、周波数 $f_s$ において最低減衰量 $\text{atts}(\text{db})$ を確保する場合、

$$x_L = f_p / f_s = 1/k, \quad \omega_p = 2\pi f_p, \quad K = K(k) \text{ として、}$$

$m$ が奇数の時

$$x_{z\nu} = \text{sn}(2\nu K/m) \quad (1-127a)$$

$m$ が偶数の時

$$x_{z\nu} = \text{sn}[(2\nu-1)K/m] \quad (1-127b)$$

$$x_\nu = \frac{x_L}{x_{z\nu}} \quad (1-128)$$

$$C_1 = \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} \frac{1-x_\nu^2}{1-x_{z\nu}^2}, \quad C_2 = \prod_{\nu=1}^{m/2} \frac{1-x_\nu^2}{1-x_{z\nu}^2} \quad (1-129)$$

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\text{attp}/10} - 1}, \quad L = \sqrt{(10^{\text{atts}/10} - 1) / (10^{\text{attp}/10} - 1)}, \quad m = \frac{K(k)K'(L^{-1})}{K'(k)K(L^{-1})} \text{ (切り上げ)}$$

とする時、

$m$ が奇数の時

$$H_m(\omega_p, s) = \frac{s}{s + \omega_p / \sigma} \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} \frac{x_\nu^2 \left\{ s^2 + (\omega_p / x_\nu)^2 \right\}}{(m-1)/2 \sqrt{C_H \sigma q_\nu} \left( s^2 + \frac{p_\nu}{q_\nu} \omega_p s + \frac{\omega_p^2}{q_\nu} \right)} \quad (3-21)$$

ただし、 $C_H$ ,  $\sigma$ ,  $p_\nu$ ,  $q_\nu$ は次式を満たすものとします。

$$\begin{aligned} & \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} [s^2 + x_\nu^2]^2 + \varepsilon^2 C_1^2 s^2 \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} [s^2 + x_{z\nu}^2]^2 \\ &= -C_H^2 (s^2 - \sigma^2) \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} [s^4 + (2q_\nu - p_\nu^2) s^2 + q_\nu^2] \end{aligned}$$

mが偶数の時

$$H_m(\omega_p, s) = \prod_{\nu=1}^{m/2} \frac{x_\nu^2 \left\{ s^2 + (\omega_p / x_\nu)^2 \right\}}{\sqrt[m/2]{C_H} q_\nu \left( s^2 + \frac{p_\nu}{q_\nu} \omega_p s + \frac{\omega_p^2}{q_\nu} \right)} \quad (3-22)$$

ただし、 $C_H$ ， $p_\nu$ ， $q_\nu$ は次式を満たすものとします。

$$\begin{aligned} & \prod_{\nu=1}^{m/2} [s^2 + x_\nu^2]^2 + \varepsilon^2 C_2^2 \prod_{\nu=1}^{m/2} [s^2 + x_{z\nu}^2]^2 \\ &= C_H^2 \prod_{\nu=1}^{m/2} [s^4 + (2q_\nu - p_\nu^2) s^2 + q_\nu^2] \end{aligned}$$

### 楕円関数 R,C 素子値の決定

楕円関数ハイパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

1 次のフィルタ **hp1** の後に、2 次のフィルタ (**et1** または **et2**) が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

2 次のフィルタ (**et1** または **et2**) が複数個使用されます。

楕円関数の伝達関数は次式を使用する。

m が奇数の時

$$H_m(\omega_p, s) = \frac{s}{s + \omega_p / \sigma} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{x_v^2 \left\{ s^2 + (\omega_p / x_v)^2 \right\}}{(m-1)/2 \sqrt{C_H \sigma q_v} \left( s^2 + \frac{p_v}{q_v} \omega_p s + \frac{\omega_p^2}{q_v} \right)} \quad (3-21)$$

ただし、 $C_H$ 、 $\sigma$ 、 $p_v$ 、 $q_v$  は次式を満たすものとします。

$$\begin{aligned} & \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \left[ s^2 + x_v^2 \right]^2 + \varepsilon^2 C_1^2 s^2 \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \left[ s^2 + x_{zv}^2 \right]^2 \\ &= -C_H^2 (s^2 - \sigma^2) \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \left[ s^4 + (2q_v - p_v^2) s^2 + q_v^2 \right] \end{aligned}$$

m が偶数の時

$$H_m(\omega_p, s) = \prod_{v=1}^{m/2} \frac{x_v^2 \left\{ s^2 + (\omega_p / x_v)^2 \right\}}{m/2 \sqrt{C_H q_v} \left( s^2 + \frac{p_v}{q_v} \omega_p s + \frac{\omega_p^2}{q_v} \right)} \quad (3-22)$$

ただし、 $C_H$ 、 $p_v$ 、 $q_v$  は次式を満たすものとします。

$$\begin{aligned} & \prod_{v=1}^{m/2} \left[ s^2 + x_v^2 \right]^2 + \varepsilon^2 C_2^2 \prod_{v=1}^{m/2} \left[ s^2 + x_{zv}^2 \right]^2 \\ &= C_H^2 \prod_{v=1}^{m/2} \left[ s^4 + (2q_v - p_v^2) s^2 + q_v^2 \right] \end{aligned}$$

### 1 次の回路の素子値決定

1次の回路は次式を使用する

$$H_1(\omega_p, s) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{s}{s + (1/C_1 R_1)} \quad (4-1)$$

(4-1) と (3-21) の1次の項を比較して、

$$FSF = \omega_p / \sigma, \quad R_1 = R_2 = Z, \quad C_1 = 1/Z / FSF \quad (4-31)$$

### 2 次の回路の素子値決定

et1 を使用する場合

伝達関数は (3-21) の2次の部分を使用する

$$H_m(\omega_p, s) = \frac{s}{s + \omega_p / \sigma} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{x_v^2 \left\{ s^2 + (\omega_p / x_v)^2 \right\}}{(m-1)/2 \sqrt{C_H} \sigma q_v \left( s^2 + \frac{p_v}{q_v} \omega_p s + \frac{\omega_p^2}{q_v} \right)} \quad (3-21)$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

(2-5) と (3-21) より、

$$\frac{\omega_p^2}{q_v} = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \quad (4-32)$$

$$\omega_{0v}^2 = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \frac{\omega_p^2}{q_v} \quad (4-33)$$

$$\frac{p_v}{q_v} \omega_p = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1 \omega_p}{(R_1 + R_4) \sqrt{q_v}} \quad (4-34)$$

$$G = \frac{x_v^2}{(m-1)/2 \sqrt{C_H} \sigma q_v} (m = odd) \quad G = \frac{x_v^2}{m/2 \sqrt{C_H} q_v} (m = even) \text{ として、 } R_3 = GR_2$$

$$(4-32) \text{ より、 } FSF = \omega_p / \sqrt{q_v} \text{ として、 } R_b = Z, C_b = 1/Z / FSF \quad (4-35)$$

$$(4-33) \text{ より、 } R_2 = \frac{q_v \omega_{0v}^2}{\omega_p^2} R_4 \quad (4-36)$$

ただし、 $\omega_{0v} = \omega_p / x_v$  とします。

(4-34) より、

$$R_1 = \frac{p_v}{3\sqrt{q_v} - p_v} R_4 \quad (3\sqrt{q_v} - p_v > 0) \quad (4-37)$$

#### et2 を使用する場合

伝達関数は (3-21) の2次の部分を使用する

$$H_m(\omega_p, s) = \frac{s}{s + \omega_p / \sigma} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{x_v^2 \left\{ s^2 + (\omega_p / x_v)^2 \right\}}{(m-1)/2 \sqrt{C_H \sigma q_v} \left( s^2 + \frac{p_v}{q_v} \omega_p s + \frac{\omega_p^2}{q_v} \right)} \quad (3-21)$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

(2-6) と (3-21) より、

$$\omega_{0v} = \frac{1}{C_b R_b} \quad (4-38)$$

$$\frac{\omega_p^2}{q_v} = \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{0v}^2 \quad (4-39)$$

$$\frac{p_v}{q_v} \omega_p = \frac{kd+kr+4(1-4kk)}{(1+kd)} \omega_{0v} \quad (4-40)$$

$$G = \frac{x_v^2}{(m-1)/2 \sqrt{C_H \sigma q_v}} (m = odd) \quad G = \frac{x_v^2}{m/2 \sqrt{C_H q_v}} (m = even) \text{ として、}$$

$$G = \frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \quad (4-41)$$

(4-39) より、

$$kr = \frac{\omega_p^2}{q_v \omega_{0v}^2} (1 + kd) - 1 > \frac{\omega_p^2}{q_v \omega_{0v}^2} - 1 > 0 \dots \dots \ominus kd > 0 \text{ を満足する } k, r \text{ に対して、}$$

$$kd = \frac{q_v \omega_{0v}^2}{\omega_p^2} (1 + kr) - 1 \quad (4-42)$$

(4-40) より、

$$kk = \frac{kd + kr + 4}{4} - \frac{p_v \omega_p (1 + kd)}{4 q_v \omega_{0v}} > 1$$

$$\therefore kr > \frac{\omega_p^2 - q_v \omega_{0v}^2 + p_v \omega_p \omega_{0v}}{\omega_p^2 + q_v \omega_{0v}^2 - p_v \omega_p \omega_{0v}} \quad (4-43)$$

$$(4-41) \text{ より、 } R_4 = \frac{1 + kd}{kk} GR_6 \quad (4-44)$$

$$\text{従って、 } kr > \max \left[ \frac{\omega_p^2}{q_v \omega_{0v}^2} - 1, \frac{\omega_p^2 - q_v \omega_{0v}^2 + p_v \omega_p \omega_{0v}}{\omega_p^2 + q_v \omega_{0v}^2 - p_v \omega_p \omega_{0v}} \right] \text{ に対して、}$$

$$FSF = \omega_{0v} = \omega_p / x_v, R_b = Z, C_b = 1/Z / FSF$$

$$R_1 = Z/2, R_2 = 2Z/kr, R_3 = (kk - 1)R_5$$

$$R_4 = \frac{1 + kd}{kk} GR_6, C_1 = 2C_b, C_2 = kdC_b/2$$

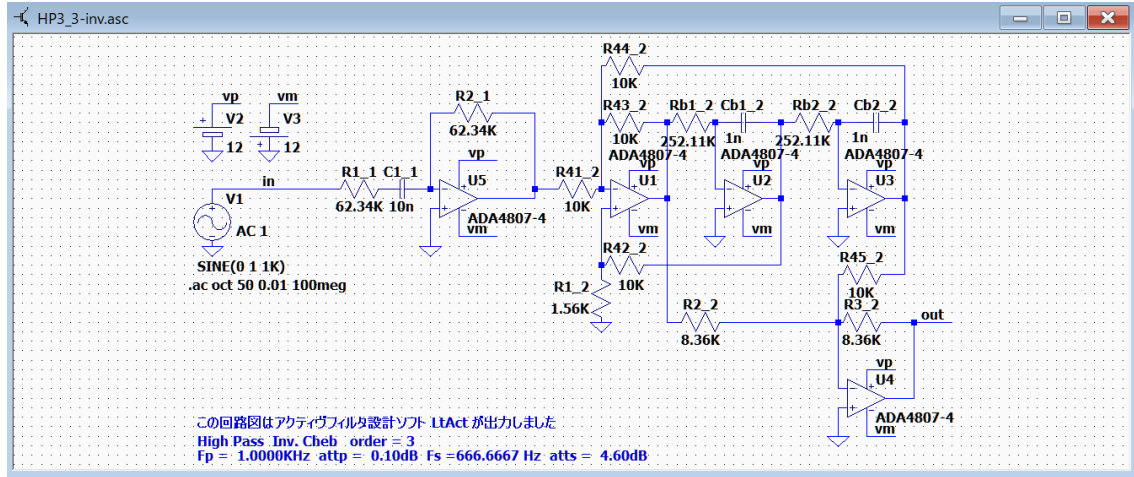
ただし、

$$kd = \frac{q_v \omega_{0v}^2}{\omega_p^2} (1 + kr) - 1, \quad kk = \frac{kd + kr + 4}{4} - \frac{p_v \omega_p (1 + kd)}{4 q_v \omega_{0v}}$$



## HP3 と HP4 の計算マクロ

### et1 使用 逆チェビシェフハイパスフィルター



et1zr Z=Rb と R=R4 を与えて、逆チェビシェフ HP3 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数

rb=Z;r4=R;wc=sqrt(p1);Q=wc/p0;FSF=wc;r1=R/(3\*Q-1);R3=p4\*R/p1;

R2=R3; cb=1/(Z\*FSF);

z=252.11 k;R=10 k;p0=1.6042 K;p1=15.7329 Meg;p2=1;p4=13.1595 Meg;\$et1zr

→ R1=1.56 k;R2= 8.36432 k;R3= 8.36432 k;R4=10 k;rb= 252.11 k;cb= 1 n

et1cr C=Cb と R=R4 を与えて、逆チェビシェフ HP3 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数

用

cb=C;r4=R;wc=sqrt(p1);Q=wc/p0;FSF=wc;r1=R/(3\*Q-1); R3=p4\*R/p1;

R2=R3; rb=1/(C\*FSF);

c=56 n;R=10 k;p0=1.6042 K;p1=15.7329 Meg;p2=1;p4=13.1595 Meg;\$et1cr

→ R1=1.56 k;R2= 8.36432 k;R3= 8.36432 k;R4= 10 k;rb= 4.50202 k;cb= 56 n

### et1 使用 楕円関数ハイパスフィルター

et1zr Z=Rb と R=R4 を与えて、楕円関数 HP3 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数

wc=sqrt(p1);FSF=wc;Rb=Z;R4=R;R1=p0\*R/(3\*sqrt(p1)-p0);R2=p4\*R/(p1\*p2);

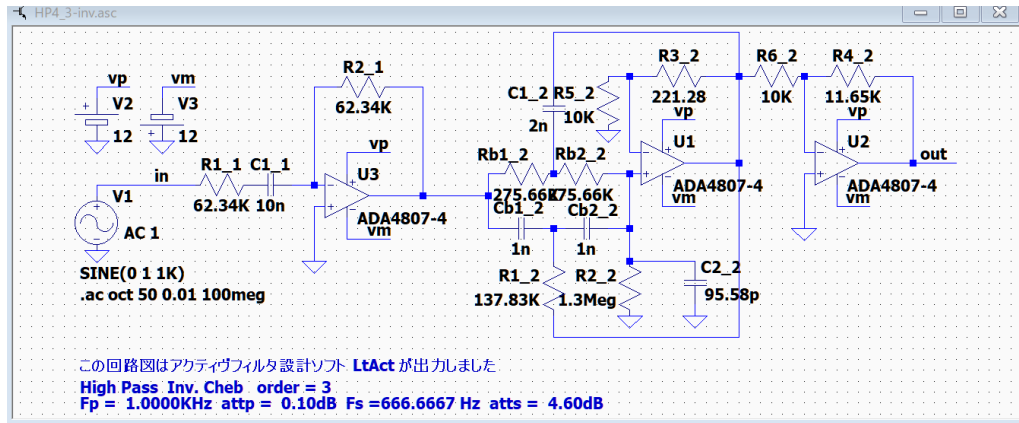
R3=p2\*R2;Cb=1/(Z\*FSF);

et1cr C=Cb と R=R4 を与えて、楕円関数 HP3 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数

wc=sqrt(p1);FSF=wc; Cb=C; Rb=1/(C\*FSF); R4=R;

R1=p0\*R/(3\*sqrt(p1)-p0);R2=p4\*R/(p1\*p2);R3=p2\*R2;

et2 使用 逆チェビシェフハイパスフィルタ



et2zkr  $Z(Rb)$ と  $kr(2Rb/R2)$ を与えて、HP4 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数用

$wv=\sqrt{p4/p2}$ ;  $FSF=wv$ ;  $R5=10\text{ k}$ ;  $R6=10\text{ k}$ ;  $Rb=z$ ;  $Cb=1/(z*FSF)$ ;

$R2=2*Rb/kr$ ;  $kd=p4*(1+kr)/(p1*p2)-1$ ;  $kk=(kd+kr+4)/4-(p0*(1+kd))/(4*wv)$ ;

$R3=(kk-1)*R5$ ;  $R1=Rb/2$ ;  $C1=2*Cb$ ;  $C2=kd*Cb/2$ ;  $R4=(1+kd)*p2*R6/kk$ ;

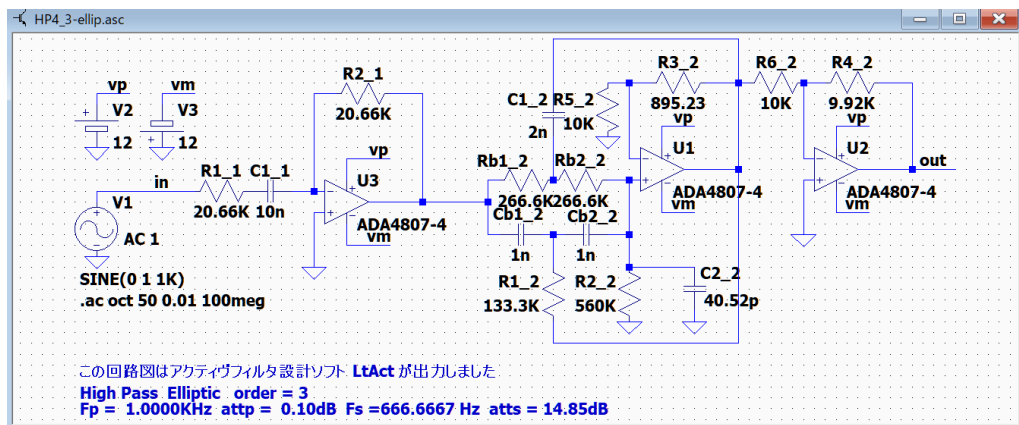
et2ckr  $C(Cb)$ と  $kr(2Rb/R2)$ を与えて、HP4 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数用

$wv=\sqrt{p4/p2}$ ;  $FSF=wv$ ;  $R5=10\text{ k}$ ;  $R6=10\text{ k}$ ;  $Cb=c$ ;  $Rb=1/(c*FSF)$ ;

$R2=2*Rb/kr$ ;  $kd=p4*(1+kr)/(p1*p2)-1$ ;  $kk=(kd+kr+4)/4-(p0*(1+kd))/(4*wv)$ ;

$R3=(kk-1)*R5$ ;  $R1=Rb/2$ ;  $C1=2*Cb$ ;  $C2=kd*Cb/2$ ;  $R4=(1+kd)*p2*R6/kk$ ;

et2 使用 楕円関数ハイパスフィルタ



et2zkr  $Z(Rb)$ と  $kr(2Rb/R2)$ を与えて、HP4 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数用

$wv=\sqrt{p4/p2}$ ;  $FSF=wv$ ;  $R5=10\text{ k}$ ;  $R6=10\text{ k}$ ;  $Rb=z$ ;  $Cb=1/(z*FSF)$ ;

$R2=2*Rb/kr$ ;  $kd=p4*(1+kr)/(p1*p2)-1$ ;  $kk=(kd+kr+4)/4-(p0*(1+kd))/(4*wv)$ ;

$R3=(kk-1)*R5$ ;  $R1=Rb/2$ ;  $C1=2*Cb$ ;  $C2=kd*Cb/2$ ;  $R4=(1+kd)*p2*R6/kk$ ;

et2ckr  $C(Cb)$ と  $kr(2Rb/R2)$ を与えて、HP4 を計算する。 逆チェビシェフと楕円関数用

$wv=\sqrt{p4/p2}$ ;  $FSF=wv$ ;  $R5=10\text{ k}$ ;  $R6=10\text{ k}$ ;  $Cb=c$ ;  $Rb=1/(c*FSF)$ ;

$R2=2*Rb/kr$ ;  $kd=p4*(1+kr)/(p1*p2)-1$ ;  $kk=(kd+kr+4)/4-(p0*(1+kd))/(4*wv)$ ;

$R3=(kk-1)*R5$ ;  $R1=Rb/2$ ;  $C1=2*Cb$ ;  $C2=kd*Cb/2$ ;  $R4=(1+kd)*p2*R6/kk$ ;

## バンドパスフィルタ

### バターワース 伝達関数

バターワースバンドパスフィルタの次数 $m$ 、中心周波数  $\omega_c$ 、通過帯域幅  $B_w$  とするとき、

$l = \text{ceil}((\text{double})(m-1)/2) - 1$  として、

バターワースバンドパスフィルタの伝達関数は

$m$  が奇数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w s}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{GKs}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{GMs}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-31)$$

$m$  が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{GKs}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{GMs}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-32)$$

(5-31), (5-32) において

$$\begin{aligned} p_k &= \cos\left(\frac{\pi(2k+1+m)}{2m}\right) \dots\dots (0 \leq k \leq l) \\ q_k &= \sin\left(\frac{\pi(2k+1+m)}{2m}\right) \dots\dots (0 \leq k \leq l) \end{aligned} \quad (5-33)$$

$$\omega_{ck} = 1$$

$$Q_k = -\frac{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}{2p_k} = -\frac{1}{2p_k}$$

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w}{(1+L)Q_k} \quad (5-34)$$

$$\begin{aligned} l_1 &= B_w^4 Q_k^2 + 8B_w^2 Q_k^2 \omega_c^2 - 4B_w^2 \omega_c^2 + 16Q_k^2 \omega_c^4 \\ l_2 &= B_w^2 Q_k^2 + 4Q_k^2 \omega_c^2 - 2\omega_c^2 \end{aligned} \quad (5-35)$$

$$L = \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2}\sqrt{l_2 + \sqrt{l_1}Q_k B_w} + B_w^2 Q_k}{4Q_k \omega_c^2}$$

$$\omega_{ra} = \omega_c \sqrt{L}, \quad \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L} \quad (5-36)$$

2 次の部分の各バンドパスフィルタの中心周波数  $\omega_{ra}$  と  $\omega_{rb}$  におけるゲインは、

$$G = \frac{B_w}{\sqrt{KM}} \quad (5-37)$$

となります。

1 次の部分のバンドパスフィルタの中心周波数  $\omega_c$  におけるゲインは、1 となります。

### チェビシェフ 伝達関数

チェビシェフバンドパスフィルタの次数 $m$ 、中心周波数 $\omega_c$ 、通過帯域幅 $B_w$ 、通過域のリプル $\text{attp}(\text{db})$

とすると、 $l = \text{ceil}((\text{double})(m-1)/2) - 1$  として

チェビシェフバンドパスフィルタの伝達関数は、

$m$ が奇数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w \omega_d s}{s^2 + B_w \omega_d s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{GKs}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{GMs}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-39)$$

$m$ が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{GKs}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{GMs}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-40)$$

(5-39), (5-40) において

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\text{attp}/10} - 1}$$

$$a_k = \frac{\pi(2k+1)}{2m} \quad k = 0, \dots, l$$

$$d = \frac{1}{m} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)$$

$$\begin{aligned} p_k &= \sin(a_k) \sinh(d) \quad k = 0, \dots, l \\ q_k &= \cos(a_k) \cosh(d) \end{aligned} \quad (5-41)$$

$$\omega_{ck} = \sqrt{p_k^2 + q_k^2}$$

$$Q_k = \frac{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}{2p_k}$$

$$\omega_d = \sinh(d)$$

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w \omega_{ck}}{(1+L)Q_k} \quad (5-42)$$

$$l_1 = B_w^4 Q_k^2 \omega_{ck}^4 + 8B_w^2 Q_k^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 - 4B_w^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 + 16Q_k^2 \omega_c^4 \quad (5-43)$$

$$l_2 = B_w^2 Q_k^2 \omega_{ck}^2 + 4Q_k^2 \omega_c^2 - 2\omega_c^2$$

$$L = \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2} \sqrt{l_2} + \sqrt{l_1} Q_k B_w \omega_{ck} + B_w^2 Q_k \omega_{ck}^2}{4Q_k \omega_c^2}$$

$$\omega_{ra} = \omega_c \sqrt{L}, \quad \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L} \quad (5-44)$$

各バンドパスフィルタの中心周波数 $\omega_{ra}$ と $\omega_{rb}$ におけるゲインは、 $G = \frac{B_w \omega_{ck}}{\sqrt{KM}}$

1 次の部分のバンドパスフィルタの中心周波数 $\omega_c$ におけるゲインは、1 となります。

### バターワースとチェビシェフ R,C 素子値の決定

バターワースとチェビシェフのバンドパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

1 次のバンドパスフィルタ（BP1 または BP2）が奇数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

2 次のバンドパスフィルタ（BP1 または BP2）が偶数個使用されます。

バターワースの伝達関数は次式を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w s}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{GKs}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{GMs}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-31)$$

チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w \omega_d s}{s^2 + B_w \omega_d s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{GKs}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{GMs}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-39)$$

チェビシェフの1次の部分は（5-31）の  $B_w$  を  $B_w \cdot \omega_d$  に変えれば素子値が決定できます。

チェビシェフの2次の部分はバターワースと同様に素子値が決定できます。

### 基本回路として BP1 を使用する場合

伝達関数は次式の 1 次の部分を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w s}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{GKs}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{GMs}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-31)$$

BP1 の伝達関数は

$$H_1(\omega_p, s) = -\frac{R_3}{2R_1} \frac{\frac{2}{CR_3} s}{s^2 + \frac{2}{CR_3} s + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C^2}} \quad (6-1)$$

# 1 次の回路の素子値決定

## バターワースの場合

$Q_{bp} = \omega_c / B_w$  とすると、

$$\frac{R_3}{2R_1} = 1 \quad \therefore R_3 = 2R_1$$

$$B_w = \omega_c / Q_{bp} = \frac{2}{CR_3} = \frac{1}{CR_1} \quad (6-5)$$

$$\omega_c^2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C^2}$$

$R_1 = Z$  とすると、

$$R_1 = Z, \quad R_3 = 2Z, \quad R_2 = \frac{Z}{2Q_{bp}^2 - 1}, \quad C = \frac{Q_{bp}}{Z\omega_c} \quad \text{ただし、} Q_{bp} > \sqrt{2}/2 \quad (6-7)$$

### チェビシェフの場合

伝達関数は次式の 1 次の部分を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w \omega_d s}{s^2 + B_w \omega_d s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{GKs}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{GMs}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-39)$$

BP1 の伝達関数は

$$H_1(\omega_p, s) = -\frac{R_3}{2R_1} \frac{\frac{2}{CR_3}s}{s^2 + \frac{2}{CR_3}s + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C^2}} \quad (6-1)$$

$$Q_{bp} = \frac{\omega_c}{B_w \omega_d} \text{ とすると、}$$

$$\frac{R_3}{2R_1} = 1 \quad \therefore R_3 = 2R_1$$

$$B_w \omega_d = \frac{2}{CR_3} = \frac{1}{CR_1} \quad \therefore C = \frac{1}{B_w \omega_d R_1} \quad (6-17)$$

$$\omega_c^2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C^2}$$

$R_1 = Z$  とすると、

$$R_1 = Z, \quad R_3 = 2Z, \quad R_2 = \frac{Z}{2\left(\frac{\omega_c}{B_w \omega_d}\right)^2 - 1}, \quad C = \frac{1}{B_w \omega_d Z} \quad (6-18)$$

$$\text{ただし、} \omega_c > \frac{\sqrt{2}}{2} B_w \omega_d$$

## 2 次の回路の素子値決定

### 基本回路として BP1 を使用する場合

伝達関数は次式の 2 次の部分を使用する。バターワースとチェビシェフは共通である。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w s}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{GKs}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{GMs}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-31)$$

BP1 の伝達関数は

$$H_1(\omega_p, s) = -\frac{R_3}{2R_1} \frac{\frac{2}{CR_3}s}{s^2 + \frac{2}{CR_3}s + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C^2}} \quad (6-1)$$

1 番目の回路については、

$$B_w = \frac{\omega_{ra}}{Q_{bp}}$$

$$\frac{R_3}{2R_1} = G \quad \therefore R_3 = 2GR_1$$

$$K = \frac{2}{CR_3} = \frac{1}{CGR_1} \quad (6-9)$$

$$\omega_{ra}^2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C^2}$$

$R_1 = Z$  とすると、

$$R_1 = Z, \quad R_3 = 2GZ, \quad R_2 = \frac{GZ}{2Q_{bp}^2 - 1}, \quad C = \frac{1}{GKZ} \quad (6-10)$$

$$\text{ただし、} \omega_{ra} > \frac{\sqrt{2G}}{2} K$$

2 番目の回路については、

$$B_w = \frac{\omega_{rb}}{Q_{bp}}$$

同様に  $R_1 = Z$  とすると、

$$R_1 = Z, \quad R_3 = 2GZ, \quad R_2 = \frac{GZ}{2Q_{bp}^2 - 1}, \quad C = \frac{1}{GKZ} \quad (6-11)$$

$$\text{ただし、} \omega_{rb} > \frac{\sqrt{2G}}{2} M$$



### 基本回路として BP2 を使用する場合

伝達関数は次式の 1 次の部分を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w s}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{GKs}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{GMs}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-31)$$

BP2 の伝達関数は

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_4 + R_3}{R_4} \frac{\frac{2}{CR_1} s}{s^2 + \frac{2}{CR_1} s + \left(\frac{1}{CR_2}\right)^2} \quad (6-2)$$

### 1 次の回路の素子値決定

#### バターワースの場合

(6-2) と (5-31) を比較して、

$$\frac{R_3 + R_4}{R_4} = 1 \quad \therefore R_3 = 0$$

$$R_1 = Z$$

$$B_w = \frac{\omega_c}{Q_{bp}} = \frac{2}{CR_1} \quad \therefore C = \frac{2Q_{bp}}{R_1\omega_c} \quad (6-12)$$

$$\omega_c^2 = \left(\frac{1}{CR_2}\right)^2 \quad \therefore R_2 = \frac{1}{C\omega_c} = \frac{R_1}{2Q_{bp}} = \frac{Z}{2Q_{bp}}$$

$$\text{従って、 } R_1 = Z, \quad R_2 = \frac{Z}{2Q_{bp}}, \quad R_3 = 0, \quad R_4 = 10K, \quad C = \frac{2Q_{bp}}{Z\omega_c} \quad (6-13)$$

### チェビシェフの場合

$Q_{bp} = \omega_c / (B_w \omega_d)$  とすると、

$$\frac{R_3 + R_4}{R_4} = 1 \quad \therefore R_3 = 0$$

$$R_1 = Z$$

$$B_w \omega_d = \frac{\omega_c}{Q_{bp}} = \frac{2}{CR_1} \quad \therefore C = \frac{2Q_{bp}}{\omega_c Z}$$

$$\omega_d^2 = \left( \frac{1}{CR_1} \right)^2 \quad \therefore R_2 = \frac{Z}{2Q_{bp}} \quad (6-22)$$

$$\text{従って、} R_1 = Z, \quad R_2 = \frac{\omega_d}{2Q_{bp}} Z, \quad R_3 = 0, \quad R_4 = 10K, \quad C = \frac{2Q_{bp}}{Z\omega_c} \quad (6-23)$$

### 2次の回路の素子値決定

#### 基本回路として BP2 を使用する場合

伝達関数は次式の 2 次の部分を使用する。バターワースとチェビシェフは共通である。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w s}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{GKs}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{GMs}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-31)$$

BP2 の伝達関数は

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_4 + R_3}{R_4} \frac{\frac{2}{CR_1} s}{s^2 + \frac{2}{CR_1} s + \left( \frac{1}{CR_2} \right)^2} \quad (6-2)$$

1 番目の回路については、

$$B_w = \frac{\omega_{rb}}{Q_{bp}}$$

$$\frac{R_3 + R_4}{R_4} = G \quad \therefore R_3 = (G - 1)R_1$$

$$R_1 = Z$$

$$K = \frac{2}{CR_1} \quad \therefore C = \frac{2}{KR_1} = \frac{2}{KZ}$$

$$\omega_{ra}^2 = \left( \frac{1}{CR_2} \right)^2 \quad \therefore R_2 = \frac{KZ}{2\omega_{ra}} \quad (6-14)$$

$$\text{従って、} R_1 = Z, \quad R_2 = \frac{K}{2\omega_{ra}} Z, \quad R_3 = (G - 1)R_4, \quad C = \frac{2}{KZ} \text{ ただし、} G > 1 \quad (6-15)$$

2 番目の回路については、同様に

$$R_1 = Z, \quad R_2 = \frac{M}{2\omega_{rb}} Z, \quad R_3 = (G - 1)R_4, \quad C = \frac{2}{MZ} \text{ ただし、} G > 1 \quad (6-16)$$

### 逆チェビシェフ 伝達関数

逆チェビシェフバンドパスフィルタの次数  $m$ 、中心周波数  $\omega_c$ 、通過帯域幅  $B_w$ 、 $\omega_{s1}$  における減衰量

atts(db)とすると、 $l = \text{ceil}((\text{double})(m-1)/2) - 1$  として

逆チェビシェフバンドパスフィルタの伝達関数は、

$m$ が奇数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w \omega_d s}{s^2 + B_w \omega_d s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-46)$$

$m$ が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-47)$$

(5-46)、(5-47) において

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{10^{\text{atts}/10} - 1}}$$

$$a_k = \frac{\pi(2k+1)}{2m} \quad k = 0, \dots, l$$

$$d = \frac{1}{m} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)$$

$$p_k = \frac{\sin(a_k) \sinh(d)}{1 + \sinh^2(d) - \sin^2(a_k)}$$

$$q_k = \frac{\cos(a_k) \cosh(d)}{\cosh^2(d) + \cos^2(a_k) - 1} \quad (5-48)$$

$$r_k = \cos(a_k)$$

$$\omega_{ck} = \sqrt{p_k^2 + q_k^2}$$

$$Q_k = \frac{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}{2p_k}$$

$$\omega_d = 1/\sinh(d)$$

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w \omega_{ck}}{(1+L)Q_k} \quad (5-49)$$

$$\begin{aligned}
l_1 &= B_w^4 Q_k^2 \omega_{ck}^4 + 8B_w^2 Q_k^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 - 4B_w^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 + 16Q_k^2 \omega_c^4 \\
l_2 &= B_w^2 Q_k^2 \omega_{ck}^2 + 4Q_k^2 \omega_c^2 - 2\omega_c^2 \\
L &= \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2}\sqrt{l_2} + \sqrt{l_1} Q_k B_w \omega_{ck} + B_w^2 Q_k \omega_{ck}^2}{4Q_k \omega_c^2}
\end{aligned} \tag{5-50}$$

$$\begin{aligned}
n_1 &= B_w^2 + 4r_k^2 \omega_c^2 \\
n_2 &= B_w^2 + 2r_k^2 \omega_c^2 \\
N &= \frac{\sqrt{n_1} B_w + n_2}{2r_k^2 \omega_c^2}
\end{aligned} \tag{5-51}$$

$$\omega_{ra} = \sqrt{L} \omega_c, \quad \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L}, \quad \omega_{za} = \sqrt{N} \omega_c, \quad \omega_{zb} = \omega_c / \sqrt{N}, \quad G = r_k \omega_{ck} \sqrt{N/L}$$

(5-46), (5-47) のカットオフ周波数  $\omega_{ra}$  の 2 次のローパスフィルタの DC におけるゲインと、カットオフ周波数  $\omega_{rb}$  の 2 次のハイパスフィルタの周波数無限大におけるゲインは等しく、

$$G = r_k \omega_{ck} \sqrt{N/L} \tag{5-52}$$

となります。

(5-46) の 1 次の部分のバンドパスフィルタの中心周波数  $\omega_c$  におけるゲインは、1 となります。

### 逆チェビシェフ R,C 素子値の決定

逆チェビシェフバンドパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

1 次のバンドパスフィルタ BP2 の後に、2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドパスフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドパスフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

逆チェビシェフの伝達関数は次式を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w \omega_d s}{s^2 + B_w \omega_d s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-46)$$

1 次の回路はBP2を使用する

BP2 の伝達関数は

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_4 + R_3}{R_4} \frac{\frac{2}{CR_1} s}{s^2 + \frac{2}{CR_1} s + \left(\frac{1}{CR_2}\right)^2} \quad (6-2)$$

### 1 次の回路の素子値決定

(5-46) の1次の部分と (6-2) より、

$$Q_{bp} = \frac{\omega_c}{B_w \omega_d}$$

とすると、

$$\frac{R_3 + R_4}{R_4} = 1 \quad \therefore R_3 = 0$$

$$R_1 = Z$$

$$B_w \cdot \omega_d = \frac{\omega_c}{Q_{bp}} = \frac{2}{C \cdot R_1} \quad \therefore C = \frac{2 \cdot Q_{bp}}{\omega_c \cdot Z}$$

$$\omega_c^2 = \left(\frac{1}{C \cdot R_2}\right)^2 \quad \therefore R_2 = \frac{1}{C \cdot \omega_c} = \frac{Z}{2 \cdot Q_{bp}} \quad (6-29)$$

$$\text{従って、} R_1 = Z, \quad R_2 = \frac{Z}{2 \cdot Q_{bp}}, \quad R_3 = 0, \quad R_4 = 10K, \quad C = \frac{2 \cdot Q_{bp}}{\omega_c \cdot Z} \quad (6-30)$$

**注意**: シミュレーション・ソフト「LTSpice」では素子値を0に設定することが出来ないなので、「LtAct」では、 $R_3 = 0$  の場合には  $R_3 = 0.01$  を設定している。

## 2 次の回路の素子値決定

伝達関数は次式の2次の部分を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w \omega_d s}{s^2 + B_w \omega_d s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-46)$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

### et1 を使用する場合

1 番目のローパス回路の場合、(2-5) と (5-46) から、

$$G \frac{L}{N} = \frac{R_3}{R_2} \quad (6-31)$$

$$\omega_{za}^2 = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} \quad (6-32)$$

$$K = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} \quad (6-33)$$

$$\omega_{ra}^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \quad (6-34)$$

従って、 $R = Z$  とすると、

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{K}{3\omega_{ra}^2 - K} R_4, \quad R_2 = \frac{\omega_{za}^2}{\omega_{ra}^2} R_4 = \frac{N}{L} R_4 \\ R_3 &= G R_4, \quad C_b = \frac{1}{Z \omega_{ra}}, \quad R_b = Z \end{aligned} \quad (6-35)$$

2 番目のハイパス回路の場合、(2-5) と (5-46) から、

$$G = \frac{R_3}{R_2} \quad (6-36)$$

$$\omega_{zb}^2 = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} \quad (6-37)$$

$$M = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} \quad (6-38)$$

$$\omega_{rb}^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \quad (6-39)$$

従って、 $R_b = Z$  とすると、

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{M}{3\omega_{rb} - M} R_4, \quad R_2 = \frac{\omega_{zb}^2}{\omega_{rb}^2} R_4 = \frac{L}{N} R_4 \\ R_3 &= \frac{GL}{N} R_4, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{rb}}, \quad R_b = Z \end{aligned} \quad (6-40)$$

#### et2 を使用する場合

伝達関数は次式の2次の部分を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w \omega_d s}{s^2 + B_w \omega_d s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-46)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)}} \quad (2-6)$$

1 番目のローパス回路の場合、(2-6) と (5-46) から、

$$G \frac{L}{N} = \frac{kk}{1+kr} \frac{R_4}{R_6} \quad (6-41)$$

$$\omega_{za}^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \quad (6-42)$$

$$K = \frac{kd + kr + 4(1 - kk)}{C_b R_b (1 + kd)} = \frac{kd + kr + 4(1 - kk)}{1 + kd} \omega_{za} \quad (6-43)$$

$$\omega_{ra}^2 = \frac{1 + kr}{C_b^2 R_b^2 (1 + kd)} = \frac{1 + kr}{1 + kd} \omega_{za}^2 \quad (6-44)$$

(6-44) より、

$$kd = \frac{N}{L}(1 + kr) - 1 > \frac{N}{L} - 1 > 0 \dots \dots \ominus kr > 0, \quad \frac{N}{L} > 1 \quad (6-45)$$

まず、 $kd$  を (6-45) を満足する値に設定します。

このとき、(6-44) より、

$$kr = \frac{L}{N}(1 + kd) - 1 \quad (6-46)$$

(6-43) より、

$$kk = \frac{kd + kr + 4}{4} - \frac{K(1 + kd)}{4\omega_{za}} \quad (6-47)$$

$$(6-46) \text{ を代入して、} kk > 1 \text{ より、} kd > \frac{(N - L)\omega_{za} + KL}{(N + L)\omega_{za} - KL}$$

(6-41) より、

$$R_4 = \frac{(1 + kr)GL}{kkN} R_6 \quad (6-48)$$

従って、 $R_b = Z$  とすると、

$$C_b = \frac{1}{Z\omega_{za}}, R_b = Z, R_1 = Z/2, R_2 = 2Z/kr$$

$$R_3 = (kk - 1)R_5, R_4 = \frac{(1 + kr)GL}{kkN} R_6 \quad (6-49)$$

$$C_1 = 2C_b, C_2 = kdC_b/2$$

ただし、 $kd > \max \left[ \left( \frac{N}{L} - 1 \right), \frac{(N - L)\omega_{za} + KL}{(N + L)\omega_{za} - KL} \right]$  を満足する  $kd$  に対して、

$$kr = \frac{L}{N}(1 + kd) - 1 \quad (6-46)$$

$$kk = \frac{kd + kr + 4}{4} - \frac{K(1 + kd)}{4\omega_{za}} \quad (6-47)$$



2 番目のハイパス回路の場合、

伝達関数は次式の2次の部分を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{B_w \omega_d s}{s^2 + B_w \omega_d s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-46)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)}} \quad (2-6)$$

(2-6) と (5-46) から、

$$G = \frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \quad (6-50)$$

$$\omega_{zb}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \quad (6-51)$$

$$M = \frac{kd+kr+4(1-4kk)}{C_b R_b(1+kd)} = \frac{kd+kr+4(1-4kk)}{1+kd} \omega_{zb} \quad (6-52)$$

$$\omega_{rb}^2 = \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{zb}^2 \quad (6-53)$$

(6-53) より、

$$kr = \frac{N}{L}(1+kd) - 1 > \frac{N}{L} - 1 > 0 \dots \dots \Theta \quad kd > 0, \quad \frac{N}{L} > 1 \quad (6-54)$$

まず、 $kr$  を (6-54) を満足する値に設定します。

このとき、(6-53) より、

$$kd = \frac{L}{N}(1+kr) - 1 \quad (6-55)$$

(6-52) より、

$$kk = \frac{kd+kr+4}{4} - \frac{M(1+kd)}{4\omega_{zb}} \quad (6-56)$$

(6-55) を代入して、 $kk > 1$  より、 $kr > \frac{(N-L)\omega_{zb} + K}{(N+L)\omega_{zb} - K}$

(6-50) より、

$$R_4 = \frac{(1+kd)G}{kk} R_6 \quad (6-57)$$

従って、 $R_b = Z$  とすると、

$$C_b = \frac{1}{Z\omega_{zb}}, R_b = Z, R_1 = Z/2, R_2 = 2Z/kr$$

$$R_3 = (kk-1)R_5, R_4 = \frac{(1+kd)G}{kk} R_6 \quad (6-58)$$

$$C_1 = 2C_b, C_2 = kdC_b/2$$

ただし、 $kr > \max\left[\left(\frac{N}{L}-1\right), \frac{(N-L)\omega_{zb}+K}{(N+L)\omega_{zb}-K}\right]$  を満足する  $kr$  に対して、

$$kd = \frac{L}{N}(1+kr) - 1 \quad (6-55)$$

$$kk = \frac{kd+kr+4}{4} - \frac{M(1+kd)}{4\omega_{zb}} \quad (6-56)$$

### 楕円関数 伝達関数

楕円関数バンドパスフィルタの次数 $m$ 、中心周波数 $\omega_c$ 、通過帯域幅  $B_w$ 、通過域のリプル  $\text{attp}(\text{db})$ 、周波数 $\omega_{s1}$ において最低減衰量  $\text{atts}(\text{db})$ を確保する場合、

$$B_w = \omega_{p2} - \omega_{p1}, \quad \omega_{p1}\omega_{p2} = \omega_{s1}\omega_{s2} = \omega_c^2$$

$$x_L = (\omega_{s2} - \omega_{s1}) / (\omega_{p2} - \omega_{p1}) = 1/k, \quad \omega_c = 2\pi f_c, \quad K = K(k)$$

として、

$m$ が奇数の時

$$x_{z\nu} = \text{sn}(2\nu K/m) \quad (1-127a)$$

$m$ が偶数の時

$$x_{z\nu} = \text{sn}[(2\nu-1)K/m] \quad (1-127b)$$

$$x_\nu = \frac{x_L}{x_{z\nu}} \quad (1-128)$$

$$C_1 = \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} \frac{1-x_\nu^2}{1-x_{z\nu}^2}, \quad C_2 = \prod_{\nu=1}^{m/2} \frac{1-x_\nu^2}{1-x_{z\nu}^2} \quad (1-129)$$

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\text{attp}/10} - 1}, \quad L = \sqrt{(10^{\text{atts}/10} - 1) / (10^{\text{attp}/10} - 1)}, \quad m = \frac{K(k)K'(L^{-1})}{K'(k)K(L^{-1})} \quad (\text{切り上げ})$$

とする時、

**$m$ が奇数の時**

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{1}{C_H \sigma} \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma + \omega_c^2} \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} \frac{(s^2 + N\omega_c^2)}{(s^2 + Ks + L\omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2/N)}{(s^2 + Ms + \omega_c^2/L)}$$

$$= \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma + \omega_c^2} \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)}$$

(5-55)

$$G = \sqrt{N/L} / \sqrt[ (m-1) ]{C_H \sigma}$$

ただし、 $C_H$ 、 $\sigma$ 、 $p_\nu$ 、 $q_\nu$ は次式を満たすものとします。

$$\prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} [s^2 + x_\nu^2]^2 + \varepsilon^2 C_1^2 s^2 \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} [s^2 + x_{z\nu}^2]^2$$

$$= -C_H^2 (s^2 - \sigma^2) \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} [s^4 + (2q_\nu - p_\nu^2)s^2 + q_\nu^2]$$

**mが偶数の時**

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{1}{C_H} \prod_{v=1}^{m/2} \frac{(s^2 + N\omega_c^2)}{(s^2 + Ks + L\omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2/N)}{(s^2 + Ms + \omega_c^2/L)}$$

$$= \prod_{v=1}^{m/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \quad (5-56)$$

$$G = \sqrt{N/L} / \sqrt[m]{C_H}$$

ただし、 $C_H$  ,  $p_v$  ,  $q_v$  は次式を満たすものとします。

$$\prod_{v=1}^{m/2} [s^2 + x_v^2]^2 + \varepsilon^2 C_H^2 \prod_{v=1}^{m/2} [s^2 + x_{zv}^2]^2$$

$$= C_H^2 \prod_{v=1}^{m/2} [s^4 + (2q_v - p_v^2)s^2 + q_v^2]$$

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w p_v}{1 + L} \quad (5-21)$$

$$l_1 = B_w^4 q_v^2 - 4B_w^2 p_v^2 \omega_c^2 + 8B_w^2 q_v \omega_c^2 + 16\omega_c^4$$

$$l_2 = B_w^2 q_v^2 - 2p_v^2 \omega_c^2 + 4q_v \omega_c^2 \quad (5-22)$$

$$L = \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2} \sqrt{l_2 + \sqrt{l_1} q_v B_w} + B_w^2 q_v}{4\omega_c^2}$$

$$n_1 = B_w^2 x_v^2 + 4\omega_c^2, \quad n_2 = B_w^2 x_v^2 + 2\omega_c^2$$

$$N = \frac{\sqrt{n_1} B_w x_v + n_2}{2\omega_c^2} \quad (5-24)$$

$$\omega_{ra} = \sqrt{L} \omega_c, \quad \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L}, \quad \omega_{za} = \sqrt{N} \omega_c, \quad \omega_{zb} = \omega_c / \sqrt{N}$$

(5-55), (5-56) のカットオフ周波数 $\omega_{ra}$ の2次のローパスフィルタのDCにおけるゲインと、カットオフ周波数 $\omega_{rb}$ の2次のハイパスフィルタの周波数無限大におけるゲインは等しく、

$$G = \sqrt{N/L} / \sqrt[m]{C_H} \sigma \dots\dots\dots m = even$$

$$G = \sqrt{N/L} / \sqrt[m]{C_H} \dots\dots\dots m = odd \quad (5-57)$$

1次の部分のバンドパスフィルタの中心周波数 $\omega_c$ におけるゲインは、1となります。

### 楕円関数 R,C 素子値の決定

楕円関数バンドパスフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

1 次のバンドパスフィルタ BP2 の後に、2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドパスフィルタ（et1 または et2）が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドパスフィルタ（et1 または et2）が複数使用されます。

楕円関数の伝達関数は次式を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{1}{C_H \sigma} \frac{B_w \sigma s}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{(s^2 + N\omega_c^2)}{(s^2 + Ks + L\omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2/N)}{(s^2 + Ms + \omega_c^2/L)} \quad (5-55)$$

$$= \frac{B_w \sigma s}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)}$$

$$G = \sqrt{N/L} / \sqrt[ (m-1) ]{C_H \sigma}$$

#### 1 次の回路の素子値決定

1 次の回路はBP2を使用する

BP2 の伝達関数は

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_4 + R_3}{R_4} \frac{\frac{2}{CR_1} s}{s^2 + \frac{2}{CR_1} s + \left(\frac{1}{CR_2}\right)^2} \quad (6-2)$$

#### 1 次の回路の素子値決定

(5-55) の 1 次の部分と (6-2) を比較して、

$Q_{bp} = \omega_c / B_w$  とすると、

$$\frac{R_3 + R_4}{R_4} = 1 \quad \therefore R_3 = 0$$

$$R_1 = Z$$

$$B_w \sigma = \frac{\omega_c \sigma}{Q_{bp}} = \frac{2}{CR_1} \quad \therefore C = \frac{2Q_{bp}}{\omega_c \sigma Z} \quad (6-29)$$

$$\omega_c^2 = \left( \frac{1}{CR_2} \right)^2 \quad \therefore R_2 = \frac{1}{C\omega_c} = \frac{\sigma}{2Q_{bp}} Z$$

$$\text{従って、} R_1 = Z, \quad R_2 = \frac{\sigma}{2Q_{bp}} Z, \quad R_3 = 0, \quad R_4 = 10K, \quad C = \frac{2Q_{bp}}{Z\omega_c} \quad (6-30)$$

## 2 次の回路の素子値決定

### et1 を使用する場合

楕円関数の伝達関数は次式の2次の部分を使用する。

$$\begin{aligned} H_m(\omega_c, s) &= \frac{1}{C_H \sigma} \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{(s^2 + N\omega_c^2)}{(s^2 + Ks + L\omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2/N)}{(s^2 + Ms + \omega_c^2/L)} \\ &= \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \end{aligned} \quad (5-55)$$

$$G = \sqrt{N/L} / \sqrt{(m-1)} C_H \sigma$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

1 番目のローパス回路の場合、(2-5) と (5-55) から、

$$G \frac{L}{N} = \frac{R_3}{R_2} \quad (6-31)$$

$$\omega_{za}^2 = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} \quad (6-32)$$

$$K = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} \quad (6-33)$$

$$\omega_{ra}^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \quad (6-34)$$

従って、 $R = Z$  とすると、

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{K}{3\omega_{ra} - K} R_4, \quad R_2 = \frac{\omega_{za}^2}{\omega_{ra}^2} R_4 = \frac{N}{L} R_4 \\ R_3 &= G R_4, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{ra}}, \quad R_b = Z \end{aligned} \quad (6-35)$$

2 番目のハイパス回路の場合、

楕円関数の伝達関数は次式の2次の部分を使用する。

$$\begin{aligned} H_m(\omega_c, s) &= \frac{1}{C_H \sigma} \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{(s^2 + N\omega_c^2)}{(s^2 + Ks + L\omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2/N)}{(s^2 + Ms + \omega_c^2/L)} \\ &= \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \end{aligned} \quad (5-55)$$

$$G = \sqrt{N/L} / \sqrt{(m-1)} C_H \sigma$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

(2-5) と (5-55) から、

$$G = \frac{R_3}{R_2} \quad (6-36)$$

$$\omega_{zb}^2 = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} \quad (6-37)$$

$$M = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} \quad (6-38)$$

$$\omega_{rb}^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \quad (6-39)$$

従って、 $R_b = Z$  とすると、

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{M}{3\omega_{rb} - M} R_4, \quad R_2 = \frac{\omega_{zb}^2}{\omega_{rb}^2} R_4 = \frac{L}{N} R_4 \\ R_3 &= \frac{GL}{N} R_4, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{rb}}, \quad R_b = Z \end{aligned} \quad (6-40)$$

## 2 次の回路の素子値決定

### et2 を使用する場合

楕円関数の伝達関数は次式の2次の部分を使用する。

$$\begin{aligned} H_m(\omega_c, s) &= \frac{1}{C_H \sigma} \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{(s^2 + N\omega_c^2)}{(s^2 + Ks + L\omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2/N)}{(s^2 + Ms + \omega_c^2/L)} \\ &= \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \end{aligned} \quad (5-55)$$

$$G = \sqrt{N/L} / {}^{(m-1)}\sqrt{C_H \sigma}$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

1 番目のローパス回路の場合、(2-6) と (5-55) から、

$$G \frac{L}{N} = \frac{kk}{1+kr} \frac{R_4}{R_6} \quad (6-41)$$

$$\omega_{za}^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \quad (6-42)$$

$$K = \frac{kd+kr+4(1-kk)}{C_b R_b (1+kd)} = \frac{kd+kr+4(1-kk)}{1+kd} \omega_{za} \quad (6-43)$$



$$\omega_{ra}^2 = \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{za}^2 \quad (6-44)$$

(6-44) より、

$$kd = \frac{N}{L}(1+kr) - 1 > \frac{N}{L} - 1 > 0. \dots \ominus kr > 0, \quad \frac{N}{L} > 1 \quad (6-45)$$

まず、 $kd$  を (6-45) を満足する値に設定します。

このとき、(6-44) より、

$$kr = \frac{L}{N}(1+kd) - 1 \quad (6-46)$$

(6-43) より、

$$kk = \frac{kd+kr+4}{4} - \frac{K(1+kd)}{4\omega_{za}} \quad (6-47)$$

$$(6-46) \text{ を代入して、} kk > 1 \text{ より、} kd > \frac{(N-L)\omega_{za} + KL}{(N+L)\omega_{za} - KL}$$

(6-41) より、

$$R_4 = \frac{(1+kr)GL}{kkN} R_6 \quad (6-48)$$

従って、 $R_b = Z$  とすると、

$$C_b = \frac{1}{Z\omega_{za}}, R_b = Z, R_1 = Z/2, R_2 = 2Z/kr$$

$$R_3 = (kk-1)R_5, R_4 = \frac{(1+kr)GL}{kkN} R_6 \quad (6-49)$$

$$C_1 = 2C_b, C_2 = kdC_b/2$$

ただし、 $kd > \max \left[ \left( \frac{L}{N} - 1 \right), \frac{(N-L)\omega_{za} + KL}{(N+L)\omega_{za} - KL} \right]$  を満足する  $kd$  に対して、

$$kr = \frac{L}{N}(1+kd) - 1 \quad (6-46)$$

$$kk = \frac{kd+kr+4}{4} - \frac{K(1+kd)}{4\omega_{za}} \quad (6-47)$$

2 番目のハイパス回路の場合、

楕円関数の伝達関数は次式の2次の部分を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{1}{C_H \sigma} \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{(s^2 + N \omega_c^2)}{(s^2 + Ks + L \omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2 / N)}{(s^2 + Ms + \omega_c^2 / L)} \quad (5-55)$$

$$= \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)}$$

$$G = \sqrt{N/L} / \sqrt{(m-1)} C_H \sigma$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

(2-6) と (5-55) から、

$$G = \frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \quad (6-50)$$

$$\omega_{zb}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \quad (6-51)$$

$$M = \frac{kd+kr+4(1-kk)}{C_b R_b (1+kd)} = \frac{kd+kr+4(1-kk)}{1+kd} \omega_{zb} \quad (6-52)$$

$$\omega_{rb}^2 = \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{zb}^2 \quad (6-53)$$

(6-53) より、

$$kr = \frac{N}{L} (1+kd) - 1 > \frac{N}{L} - 1 > 0 \dots \dots \ominus kd > 0, \quad \frac{N}{L} > 0 \quad (6-54)$$

まず、 $kr$  を (6-54) を満足する値に設定します。

このとき、(6-53) より、

$$kd = \frac{L}{N}(1+kr) - 1 \quad (6-55)$$

(6-52) より、

$$kk = \frac{kd+kr+4}{4} - \frac{M(1+kd)}{4\omega_{zb}} \quad (6-56)$$

(6-55) を代入して、 $kk > 1$  より、 $kr > \frac{(N-L)\omega_{zb} + K}{(N+L)\omega_{zb} - K}$

(6-50) より、

$$R_4 = \frac{(1+kd)G}{kk} R_6 \quad (6-57)$$

従って、 $R_b = Z$  とすると、

$$C_b = \frac{1}{Z\omega_{zb}}, R_b = Z, R_1 = Z/2, R_2 = 2Z/kr$$

$$R_3 = (kk-1)R_5, R_4 = \frac{(1+kd)G}{kk} R_6 \quad (6-58)$$

$$C_1 = 2C_b, C_2 = kdC_b/2$$

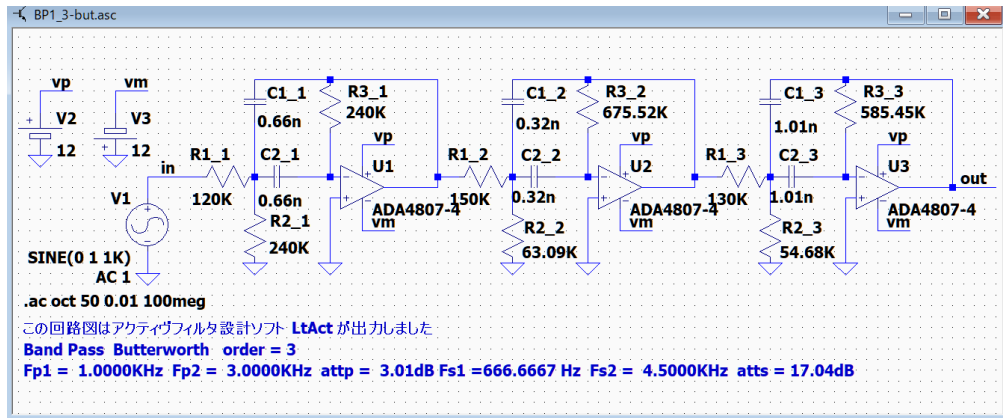
ただし、 $kr > \max\left[\left(\frac{N}{L}-1\right), \frac{(N-L)\omega_{zb} + K}{(N+L)\omega_{zb} - K}\right]$  を満足する  $kr$  に対して、

$$kd = \frac{L}{N}(1+kr) - 1 \quad (6-55)$$

$$kk = \frac{kd+kr+4}{4} - \frac{M(1+kd)}{4\omega_{zb}} \quad (6-56)$$

# バンドパスフィルタ BP1 と BP2 の計算マクロ

## バターワース、チェビシェフ バンドパスフィルタ



bp1z Z=R1 を与えて、BP1 を計算する バターワースとチェビシェフ用

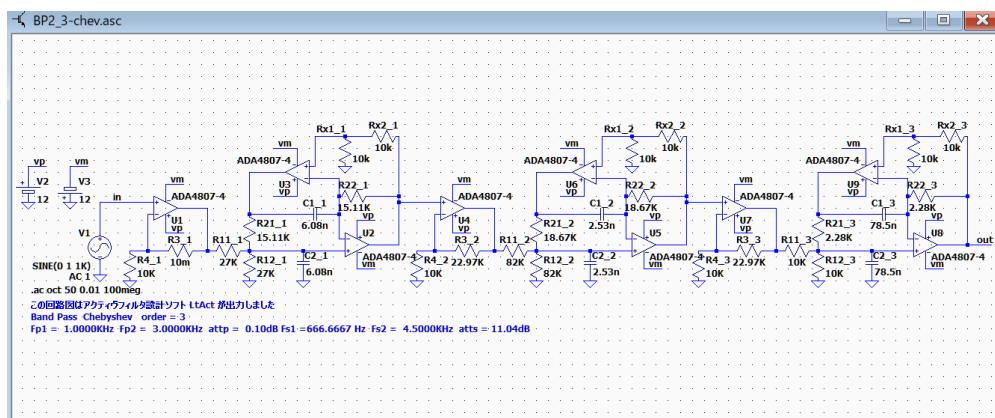
$$y=p3/p0; wc=\sqrt{p1}; q=wc/p0; r1=z; r3=2*y*r1; c=q/(y*wc*z); r2=y*z/(2*q*y)$$

bp1c C を与えて、BP1 を計算する バターワースとチェビシェフ用

$$C1=c; C2=c; y=p3/p0; wc=\sqrt{p1}; q=wc/p0; z=q/(y*wc*c); r1=z; r3=2*y*r1; r2=y*z/(2*q*y)$$

$$z=120 \text{ k}; p0=12.5664 \text{ K}; p1=118.4353 \text{ Meg}; p3=12.5664 \text{ K}; \text{\$bp1z}$$

$$\rightarrow R1=120 \text{ k} \quad R2=240.0030805 \text{ k} \quad R3=240.000 \text{ k} \quad C1\_1=C1\_2=0.6631440455 \text{ n}$$



bp2z Z=R1 を与えて、BP2 を計算する バターワースとチェビシェフ用

$$y=p3/p0; wc=\sqrt{p1}; q=wc/p0; r1=z; r4=10 \text{ k}; r3=(y-1)*r4; c=2/(z*p0); r2=z/(2*q)$$

bp2c Z=R1 を与えて、BP2 を計算する バターワースとチェビシェフ用

$$C1=c; C2=c; y=p3/p0; wc=\sqrt{p1}; q=wc/p0; z=2*q/(wc*c); r1=z; r4=10 \text{ k};$$

$$r3=(y-1)*r4; r2=z/(2*q);$$

$$z=27 \text{ k}; p0=12.1819 \text{ K}; p1=118.4353 \text{ Meg}; p3=12.1819 \text{ K}; \text{\$bp2z}$$

$$\rightarrow R1=27 \text{ k} \quad R2=15.1115223 \text{ k} \quad R3=0(0.01 \text{ にする}) \quad R4=10 \text{ k} \quad C1=C2=6.080666733 \text{ n}$$

$$C=6.080666733 \text{ n}; p0=12.1819 \text{ K}; p1=118.4353 \text{ Meg}; p3=12.1819 \text{ K}; \text{\$bp2c}$$

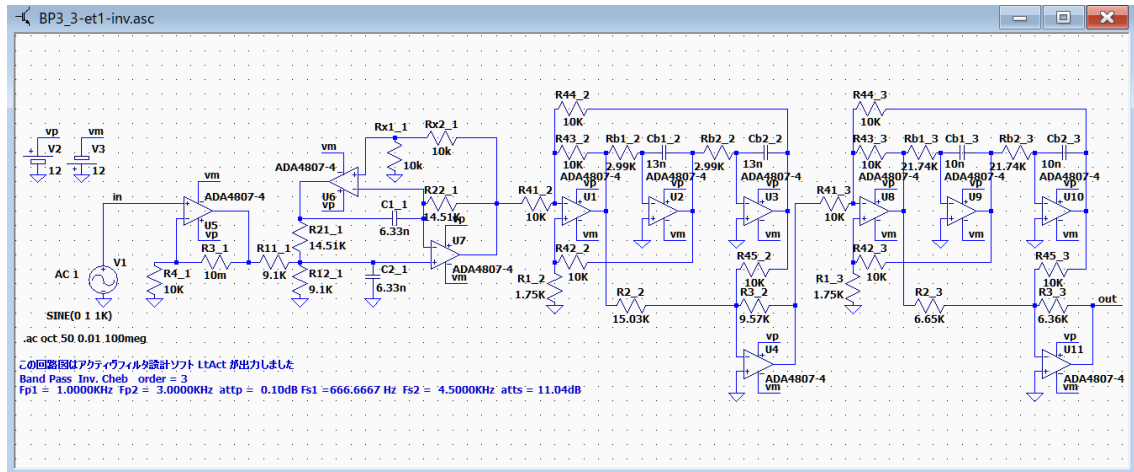
$$\rightarrow R1=27 \text{ k} \quad R2=15.1115223 \text{ k} \quad R3=0(0.01 \text{ にする}) \quad R4=10 \text{ k} \quad C1=C2=6.080666733 \text{ n}$$

## バンドパスフィルタ BP3 と BP4 の計算マクロ

## 逆チェビシェフ、楕円関数 バンドパスフィルター

奇数次数の場合は、最初の 1 次フィルターは BP2 を使用し、残りは et1 または et2 を使用する。偶数次数の場合は、全て et1 または et2 を使用する。

## et1 を使用する場合 (BP3)



et1zr Z=Rb と R=R4 を与えて BP3 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

rb=Z;r4=R;wc=sqrt(p1); Q=wc/p0;FSF=wc; r1=R/(3\*Q-1);R3=p4\*R/p1;

R2=R3/p2; cb=1/(Z\*FSF);

z=2.9876 K;R=10 k;p0=11.5153 K;p1=662.9185 Meg;p2=0.6365;p4=634.0993 Meg;\$et1zr

→ Rb= 2.9876 k Cb= 13.00012355 n R1= 1.75200765 k

R2= 15.02791489 k R3= 9.565267827 k R4=10 k

et1cr C=Cb と R=R4 を与えて BP3 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

cb=C;r4=R;wc=sqrt(p1); Q=wc/p0;FSF=wc; r1=R/(3\*Q-1);R3=p4\*R/p1;

R2=R3/p2; rb=1/(C\*FSF);

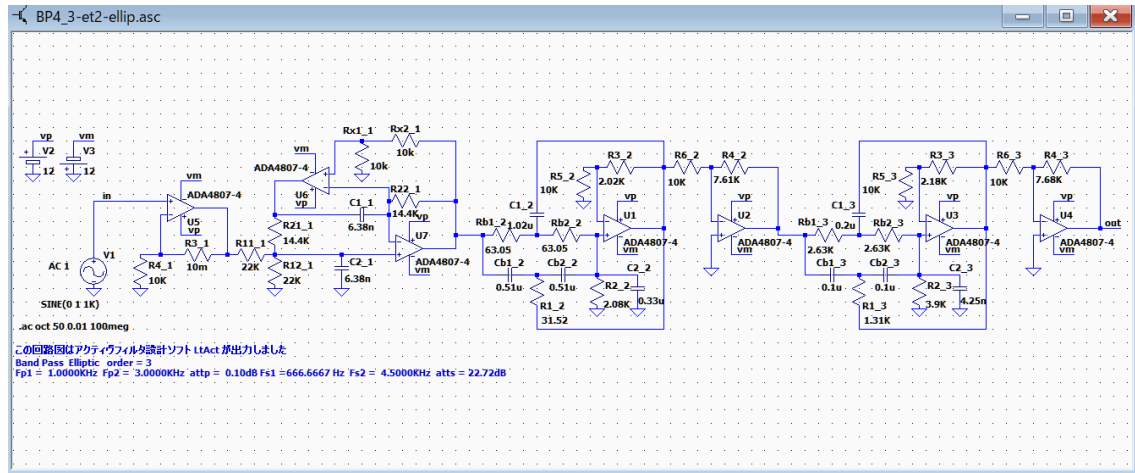
c=13.00012355 n;R=10 k; p0=11.5153 K;p1=662.9185 Meg;p2=0.6365;

p4=634.0993 Meg;\$et1cr

→ Rb= 2.9876 k Cb= 13.00012355 n R1= 1.75200765 k

R2= 15.02791489 k R3= 9.565267827 k R4=10 k

et2 を使用する場合 (BP4)



et2zkr  $Z=R_b$  と  $kr=2R_b/R_2$  を与えて BP4 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

$wc=\sqrt{p_1}$ ;  $Q=\sqrt{p_1}/p_0$ ;  $FSF=\sqrt{p_1/p_2}$ ;  $R_b=Z$ ;  $R_2=2*R_b/kr$ ;  $R_5=10\text{ k}$ ;  
 $R_6=10\text{ k}$ ;  $kd=(1+kr-p_2)/p_2$ ;  $C_b=1/(Z*FSF)$ ;  $kk=(kd+kr+4*(\sqrt{p_2}*(1+kd)/Q))/4$ ;  
 $R_3=(kk-1)*R_5$ ;  $R_4=(1+kr)/kk*R_6$ ;  $C_1=2*C_b$ ;  $C_2=kd*C_b/2$ ;

$z=63.0485$ ;  $kr=2*63.0485/(2.0777\text{ K})$ ;  $p_0=7.3895\text{ K}$ ;  $p_1=447.1818\text{ Meg}$ ;

$p_2=0.3987$ ;  $p_4=385.6657\text{ Meg}$ ;  $\$et2zkr$

→  $R_b=63.0485$   $C_b=0.5099679131\text{ u}$   $C_1=1.019935826\text{ u}$   $C_2=0.3300516025\text{ u}$

$R_1=31.52425$   $R_2=2.0777\text{ k}$   $R_3=2.024899049\text{ k}$

$R_4=7.607364133\text{ k}$   $R_5=10\text{ k}$   $R_6=10\text{ k}$

et2ckr  $C=C_b$  と  $kr=2R_b/R_2$  を与えて BP4 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

$wc=\sqrt{p_1}$ ;  $Q=\sqrt{p_1}/p_0$ ;  $FSF=\sqrt{p_1/p_2}$ ;  $C_b=C$ ;  $R=1/(C*FSF)$ ;  $R_b=R$ ;  
 $R_2=2*R_b/kr$ ;  $R_5=10\text{ k}$ ;  $R_6=10\text{ k}$ ;  $kd=(1+kr-p_2)/p_2$ ;  $kk=(kd+kr+4*(\sqrt{p_2}*(1+kd)/Q))/4$ ;  
 $R_3=(kk-1)*R_5$ ;  $R_4=(1+kr)/kk*R_6$ ;  $C_1=2*C_b$ ;  $C_2=kd*C_b/2$ ;

$c=0.5099679131\text{ u}$ ;  $kr=2*63.0485/(2.0777\text{ K})$ ;  $p_0=7.3895\text{ K}$ ;  $p_1=447.1818\text{ Meg}$ ;  $p_2=0.3987$ ;

$p_4=385.6657\text{ Meg}$ ;  $\$et2ckr$

→  $R_b=63.0485$   $C_b=0.5099679131\text{ u}$   $C_1=1.019935826\text{ u}$   $C_2=0.3300516025\text{ u}$

$R_1=31.52425$   $R_2=2.0777\text{ k}$   $R_3=2.024899049\text{ k}$

$R_4=7.607364133\text{ k}$   $R_5=10\text{ k}$   $R_6=10\text{ k}$

## バンドエリミネーションフィルタ

### バターワース 伝達関数

バターワース B E フィルタの次数  $m$ 、中心周波数  $\omega_c$ 、阻止帯域幅  $B_w$  とするとき、  
 $l = \text{ceil}((\text{double})(m-1)/2) - 1$  として、

バターワース B E フィルタの伝達関数は

$m$  が奇数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-31)$$

$m$  が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-32)$$

(7-31), (7-32) において

$$\begin{aligned} p_k &= \cos\left(\frac{\pi(2k+1+m)}{2m}\right) \dots (0 \leq k \leq l) \\ q_k &= \sin\left(\frac{\pi(2k+1+m)}{2m}\right) \dots (0 \leq k \leq l) \\ \omega_{ck} &= 1, \quad Q_k = -\frac{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}{2p_k} = -\frac{1}{2p_k} \end{aligned} \quad (7-33)$$

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w}{(1+L)Q_k \omega_{ck}} \quad (7-34)$$

$$\begin{aligned} l_1 &= B_w^4 Q_k^2 + 8B_w^2 Q_k^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 - 4B_w^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 + 16Q_k^2 \omega_c^4 \omega_{ck}^4 \\ l_2 &= B_w^2 Q_k^2 + 4Q_k^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 - 2\omega_c^2 \omega_{ck}^2 \\ L &= \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2}\sqrt{l_2} + \sqrt{l_1} Q_k B_w + B_w^2 Q_k}{4Q_k \omega_c^2 \omega_{ck}^2} \end{aligned} \quad (7-35)$$

$$\omega_{ra} = \sqrt{L} \omega_c, \quad \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L} \quad (7-36)$$

2 次の部分のハイパスフィルタとローパスフィルタのゲインは、

$$A_2 = \sqrt{L} \quad (7-37)$$

となります。

1 次の部分の B E フィルタの  $s=0, s=\infty$  におけるゲインは、1 となります。

### バターワース R,C 素子値の決定

バターワースバンドエリミネーションフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

1 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) の後に、2 次のハイパスフィルタと 2 次のローパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

### et1 を使用する場合、

バターワースの伝達関数は次式を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{1}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-31)$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

### 1 次の回路の素子値決定

(7-31) の 1 次の部分と (2-5) より、

$$\frac{R_3}{R_2} = 1 \quad \therefore R_3 = R_2$$

$$\omega_c^2 = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} \dots \therefore R_2 = R_4 \quad (8-3)$$

$$B_w = \omega_c / Q_{be} = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_c$$

$$\therefore R_1 = \frac{R_4}{3Q_{be} - 1}, \quad R_2 = R_3 = R_4$$

$$Q_{be} > \frac{1}{3}$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}$$



## 2 次の回路の素子値決定

バターワースの伝達関数は次式を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + B_\omega s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2) / \sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{1}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-31)$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

(7-31) の 2 次の部分と (2-5) より、

1 番目の 2 次のハイパスフィルタ回路については、

$$\begin{aligned} \frac{R_3}{R_2} &= \sqrt{L} \quad \therefore R_3 = \sqrt{L} R_2 \\ \omega_{ra}^2 &= \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \dots \therefore \omega_{ra} = \frac{1}{C_b R_b} \\ \omega_c^2 &= \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{ra}^2 \dots \therefore R_2 = \frac{R_4}{L} \\ K &= \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_{ra} \\ \therefore R_1 &= \frac{KR_4}{3\omega_{ra} - K}, \quad R_2 = \frac{R_4}{L}, \quad R_3 = \frac{R_4}{\sqrt{L}} \\ \omega_{ra} &> \frac{K}{3} \\ R_b &= Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{ra}} \end{aligned} \quad (8-4)$$

2 番目の 2 次のローパスフィルタ回路については、同様に

$$\begin{aligned} \frac{R_3}{R_2} &= \frac{1}{\sqrt{L}} \quad \therefore R_3 = \frac{1}{\sqrt{L}} R_2 \\ \omega_{rb}^2 &= \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \dots \therefore \omega_{rb} = \frac{1}{C_b R_b} \end{aligned} \quad (8-5)$$

$$\omega_c^2 = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{rb}^2 \dots \therefore R_2 = LR_4$$

$$M = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_{rb}$$

$$\therefore R_1 = \frac{MR_4}{3\omega_{rb} - M}, \quad R_2 = LR_4, \quad R_3 = \sqrt{L}R_4$$

$$\omega_{rb} > \frac{M}{3}$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{rb}}$$

#### et2 を使用する場合

バターワースの伝達関数は次式を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-31)$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

#### 1 次の回路の素子値決定

(7-31) の 1 次の部分と (2-6) より、

$R_b = Z, \quad Q_{be} = \omega_c / B_w$  とすると、

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = 1 \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)R_6}{kk} \quad (8-6)$$

$$\omega_c^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \frac{1+kr}{1+kd} \quad (8-7)$$

$$\therefore kr = kd$$

$$B_w = \frac{\omega_c}{Q_{be}} = \frac{kd + kr + 4 - 4kk}{C_b R_b (1 + kd)} = \frac{2kd + 4 - 4kk}{1 + kd} \omega_c$$

$$\therefore kk = \frac{(2Q_{be} - 1)kd + 4Q_{be} - 1}{4Q_{be}} \quad (8-8)$$

$$kk > 1 \quad \therefore (2Q_{be} - 1)kd > 1 \quad \therefore Q_{be} > \frac{\frac{1}{kd} + 1}{2} > \frac{1}{2} \text{ を満たす } Q_{be} \text{ に対して、}$$

$$kd > \frac{1}{2Q_{be} - 1} \quad (8-9)$$

を満たす、 $kd$  を選択すると、

$$Q_{be} > \frac{1}{2}, \quad kd = kr > \frac{1}{2Q_{be} - 1}, \quad kk = \frac{(2Q_{be} - 1)kd + 4Q_{be} - 1}{4Q_{be}}$$

$$R_1 = \frac{Z}{2}, \quad R_2 = \frac{2Z}{kr}, \quad R_3 = (kk - 1)R_5, \quad R_4 = \frac{(1 + kd)R_6}{kk} \quad (8-10)$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}, \quad C_1 = 2C_b, \quad C_2 = \frac{kdC_b}{2}$$

## 2 次の回路の素子値決定

バターワースの伝達関数は次式を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{L}}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-31)$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1 + kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd + kr + 4 - 4kk}{C_b R_b (1 + kd)} s + \frac{1 + kr}{C_b^2 R_b^2 (1 + kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

(7-31) の 2 次の部分と (2-6) より、

1 番目の 2 次のハイパスフィルタ回路については、

$$\frac{kk}{1 + kd} \frac{R_4}{R_6} = \sqrt{L} \dots \therefore R_4 = \frac{(1 + kd)\sqrt{L}R_6}{kk} \quad (8-11)$$

$$\omega_c^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \quad (8-12)$$

$$\omega_{ra}^2 = L \omega_c^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \frac{1+kr}{1+kd}$$

$$\therefore kr = L(1+kd) - 1 > L - 1 \text{ に対して、 } kd = \frac{1+kr}{L} - 1 \quad (8-13)$$

$$K = \frac{kd + kr + 4 - 4kk}{C_b R_b (1+kd)} = \frac{kd + kr + 4 - 4kk}{1+kd} \omega_c$$

$$\therefore kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{K(1+kd)}{\omega_c}}{4} \quad (8-14)$$

$$(8-13) \text{ を代入して、 } kk > 1 \text{ より、 } kr > \frac{(L-1)\omega_c + K}{(L+1)\omega_c - K} \quad (8-15)$$

従って、

$$kr > \max \left[ (L-1), \frac{(L-1)\omega_c + K}{(L+1)\omega_c - K} \right] \text{ に対して、}$$

$$kd = \frac{1+kr}{L} - 1, \quad kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{K(1+kd)}{\omega_c}}{4}$$

$$R_1 = \frac{Z}{2}, \quad R_2 = \frac{2Z}{kr}, \quad R_3 = (kk-1)R_5, \quad R_4 = \frac{(1+kd)\sqrt{L}R_6}{kk} \quad (8-16)$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}, \quad C_1 = 2C_b, \quad C_2 = \frac{kdC_b}{2}$$

となります。

2 番目の2次のローパスフィルタ回路については、同様に  
バターワースの伝達関数は次式を使用する。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + B_\omega s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-31)$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = \frac{1}{\sqrt{L}} \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)R_6}{kk\sqrt{L}} \quad (8-17)$$

$$\omega_c^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \quad (8-18)$$

$$\omega_{rb}^2 = \frac{\omega_c^2}{L} = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \frac{1+kr}{1+kd}$$

$$\therefore kd = L(1+kr) - 1 > L - 1 \text{ に対して、 } kr = \frac{1+kd}{L} - 1 \quad (8-19)$$

$$M = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} = \frac{kd+kr+4-4kk}{1+kd} \omega_c$$

$$\therefore kk = \frac{kd+kr+4 - \frac{M(1+kd)}{\omega_c}}{4} \quad (8-20)$$

$$(8-19) \text{ を代入して、} kk > 1 \text{ より、} kd > \frac{(L-1)\omega_c + K}{(L+1)\omega_c - K} \quad (8-21)$$

従って、

$$kd > \max \left[ (L-1), \frac{(L-1)\omega_c + K}{(L+1)\omega_c - K} \right] \text{ に対して、}$$

$$kr = \frac{1+kd}{L} - 1, \quad kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{M(1+kd)}{\omega_c}}{4}$$

$$R_1 = \frac{Z}{2}, \quad R_2 = \frac{2Z}{kr}, \quad R_3 = (kk-1)R_5, \quad R_4 = \frac{(1+kd)R_6}{kk\sqrt{L}} \quad (8-22)$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}, \quad C_1 = 2C_b, \quad C_2 = \frac{kdC_b}{2}$$

### チェビシェフ 伝達関数

チェビシェフ B E フィルタの次数  $m$ 、中心周波数  $\omega_c$ 、阻止帯域幅  $B_w$ 、通過域のリプル  $\text{attp}(\text{db})$  とするとき、 $l = \text{ceil}((\text{double})(m-1)/2) - 1$  として

$m$  が奇数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-39)$$

$m$  が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-40)$$

(7-39), (7-40) において

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\text{attp}/10} - 1}$$

$$a_k = \frac{\pi(2k+1)}{2m} \quad k = 0, \dots, l$$

$$d = \frac{1}{m} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)$$

$$\begin{aligned} p_k &= \sin(a_k) \sinh(d) \quad k = 0, \dots, l \\ q_k &= \cos(a_k) \cosh(d) \end{aligned} \quad (7-41)$$

$$\omega_{ck} = \sqrt{p_k^2 + q_k^2}$$

$$Q_k = \frac{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}{2p_k}$$

$$\omega_d = \sinh(d)$$

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w}{(1+L)Q_k\omega_{ck}} \quad (7-42)$$

$$l_1 = B_w^4 Q_k^2 + 8B_w^2 Q_k^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 - 4B_w^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 + 16Q_k^2 \omega_c^4 \omega_{ck}^4 \quad (7-43)$$

$$l_2 = B_w^2 Q_k^2 + 4Q_k^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 - 2\omega_c^2 \omega_{ck}^2$$

$$L = \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2}\sqrt{l_2} + \sqrt{l_1}Q_k B_w + B_w^2 Q_k}{4Q_k \omega_c^2 \omega_{ck}^2}$$

$$\omega_{ra} = \omega_c \sqrt{L}, \quad \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L} \quad (7-44)$$

2 次のハイパスフィルタとローパスフィルタのゲインは、 $A_2 = \sqrt{L}$

### チェビシェフ R,C 素子値の決定

フィルタの次数が奇数の場合は、

1 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) の後に、2 次のハイパスフィルタと 2 次のローパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

et1 を使用する場合、

チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2) / \sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{1}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-39)$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

#### 1 次の回路の素子値決定

(7-39) の 1 次の部分と (2-5) より、

$$R_b = Z, \quad Q_{be} = \omega_c / B_w \text{ とすると、}$$

$$\frac{R_3}{R_2} = 1 \quad \therefore R_3 = R_2$$

$$\omega_c^2 = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} \dots \therefore R_2 = R_4$$

$$\frac{B_w}{\omega_d} = \frac{\omega_c}{\omega_d Q_{be}} = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_c \quad (8-23)$$

$$\therefore R_1 = \frac{R_4}{3\omega_d Q_{be} - 1}, \quad R_2 = R_3 = R_4$$



$$Q_{be} > \frac{1}{3\omega_d}$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}$$

## 2 次の回路の素子値決定

チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d}s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-39)$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)}s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

(7-39) の 2 次の部分と (2-5) より、

1 番目の 2 次のハイパスフィルタ回路については、

$$\begin{aligned} \frac{R_3}{R_2} &= \sqrt{L} \quad \therefore R_3 = \sqrt{L}R_2 \\ \omega_{ra}^2 &= \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \dots \therefore \omega_{ra} = \frac{1}{C_b R_b} \\ \omega_c^2 &= \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{ra}^2 \dots \therefore R_2 = \frac{R_4}{L} \\ K &= \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_{ra} \quad (8-24) \\ \therefore R_1 &= \frac{KR_4}{3\omega_{ra} - K}, \quad R_2 = \frac{R_4}{L}, \quad R_3 = \frac{R_4}{\sqrt{L}} \\ \omega_{ra} &> \frac{K}{3} \\ R_b &= Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{ra}} \end{aligned}$$

2 番目の2次のローパスフィルタ回路については、同様に  
チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2) / \sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2}{s^2 + \omega_c^2} \quad (7-39)$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

(7-39) の2次の部分と (2-5) より、

$$\begin{aligned} \frac{R_3}{R_2} &= \frac{1}{\sqrt{L}} \quad \therefore R_3 = \frac{1}{\sqrt{L}} R_2 \\ \omega_{rb}^2 &= \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \dots \therefore \omega_{rb} = \frac{1}{C_b R_b} \\ \omega_c^2 &= \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{rb}^2 \dots \therefore R_2 = L R_4 \\ M &= \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_{rb} \quad (8-25) \\ \therefore R_1 &= \frac{M R_4}{3\omega_{rb} - M}, \quad R_2 = L R_4, \quad R_3 = \sqrt{L} R_4 \\ \omega_{rb} &> \frac{M}{3} \\ R_b &= Z, \quad C_b = \frac{1}{Z \omega_{rb}} \end{aligned}$$

et2 を使用する場合、

伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2) / \sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2}{s^2 + \omega_c^2} \quad (7-39)$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

### 1 次の回路の素子値決定

(7-39) の 1 次の部分と (2-6) より、

$R_b = Z$ ,  $Q_{be} = \omega_c / B_w$  とすると、

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = 1 \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)R_6}{kk} \quad (8-26)$$

$$\omega_c^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \frac{1+kr}{1+kd} \quad (8-27)$$

$$\therefore kr = kd$$

$$\frac{B_w}{\omega_d} = \frac{\omega_c}{\omega_d Q_{be}} = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} = \frac{2kd+4-4kk}{1+kd} \omega_c \quad (8-28)$$

$$\therefore kk = \frac{(2\omega_d Q_{be} - 1)kd + 4\omega_d Q_{be} - 1}{4\omega_d Q_{be}}$$

$$kk > 1 \quad \therefore (2\omega_d Q_{be} - 1)kd > 1 \quad \therefore Q_{be} > \frac{\frac{1}{kd} + 1}{2\omega_d} > \frac{1}{2\omega_d} \text{ を満たす } Q_{be} \text{ に対して、}$$

$$kd > \frac{1}{2\omega_d Q_{be} - 1} \quad (8-29)$$

を満たす、 $kd$  を選択すると、 $R_b = Z$  として、

$$\begin{aligned}
 Q_{be} &> \frac{1}{2\omega_d}, \quad kd = kr > \frac{1}{2\omega_d Q_{be} - 1}, \quad kk = \frac{(2\omega_d Q_{be} - 1)kd + 4\omega_d Q_{be} - 1}{4\omega_d Q_{be}} \\
 R_1 &= \frac{Z}{2}, \quad R_2 = \frac{2Z}{kr}, \quad R_3 = (kk - 1)R_5, \quad R_4 = \frac{(1 + kd)R_6}{kk} \\
 R_b &= Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}, \quad C_1 = 2C_b, \quad C_2 = \frac{kdC_b}{2}
 \end{aligned} \tag{8-30}$$

となります。

## 2 次の回路の素子値決定

伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d}s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2}{s^2 + \omega_c^2} \tag{7-39}$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1 + kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd + kr + 4 - 4kk}{C_b R_b(1 + kd)}s + \frac{1 + kr}{C_b^2 R_b^2(1 + kd)}} \tag{2-6}$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

(7-39) の 2 次の部分と (2-6) より、

1 番目の 2 次のハイパスフィルタ回路については、

$$\frac{kk}{1 + kd} \frac{R_4}{R_6} = \sqrt{L} \dots \therefore R_4 = \frac{(1 + kd)\sqrt{L}R_6}{kk} \tag{8-31}$$

$$\omega_c^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \tag{8-32}$$

$$\omega_{ra}^2 = L\omega_c^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \frac{1 + kr}{1 + kd}$$

$$\therefore kr = L(1 + kd) - 1 > L - 1 \text{ に対して、} \quad kd = \frac{1 + kr}{L} - 1 \tag{8-33}$$

$$K = \frac{kd + kr + 4 - 4kk}{C_b R_b (1 + kd)} = \frac{kd + kr + 4 - 4kk}{1 + kd} \omega_c$$

$$\therefore kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{K(1 + kd)}{\omega_c}}{4} \quad (8-34)$$

$$(8-33) \text{ を代入して、} kk > 1 \text{ より、} kr > \frac{(L-1)\omega_c + K}{(L+1)\omega_c - K} \quad (8-35)$$

従って、

$$kr > \max \left[ (L-1), \frac{(L-1)\omega_c + K}{(L+1)\omega_c - K} \right] \text{ に対して、}$$

$$kd = \frac{1 + kr}{L} - 1, \quad kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{K(1 + kd)}{\omega_c}}{4}$$

$$R_1 = \frac{Z}{2}, \quad R_2 = \frac{2Z}{kr}, \quad R_3 = (kk - 1)R_5, \quad R_4 = \frac{(1 + kd)\sqrt{L}R_6}{kk} \quad (8-36)$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}, \quad C_1 = 2C_b, \quad C_2 = \frac{kdC_b}{2}$$

となります。

2 番目の 2 次のローパスフィルタ回路については、同様に伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d}s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2}{s^2 + \omega_{rb}^2} \quad (7-39)$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1 + kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2}{s^2 + \frac{kd + kr + 4 - 4kk}{C_b R_b (1 + kd)} s + \frac{1 + kr}{C_b^2 R_b^2 (1 + kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = \frac{1}{\sqrt{L}} \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)R_6}{kk\sqrt{L}} \quad (8-37)$$

$$\omega_c^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \quad (8-38)$$

$$\omega_{rb}^2 = \frac{\omega_c^2}{L} = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \frac{1+kr}{1+kd}$$

$$\therefore kd = L(1+kr) - 1 > L - 1 \text{ に対して、 } kr = \frac{1+kd}{L} - 1 \quad (8-39)$$

$$M = \frac{kd + kr + 4 - 4kk}{C_b R_b (1+kd)} = \frac{kd + kr + 4 - 4kk}{1+kd} \omega_c \quad (8-40)$$

$$\therefore kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{M(1+kd)}{\omega_c}}{4}$$

$$(8-39) \text{ を代入して、 } kk > 1 \text{ より、 } kd > \frac{(L-1)\omega_c + K}{(L+1)\omega_c - K} \quad (8-41)$$

従って、

$$kd > \max \left[ (L-1), \frac{(L-1)\omega_c + K}{(L+1)\omega_c - K} \right] \text{ に対して、}$$

$$kr = \frac{1+kd}{L} - 1, \quad kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{M(1+kd)}{\omega_c}}{4}$$

$$R_1 = \frac{Z}{2}, \quad R_2 = \frac{2Z}{kr}, \quad R_3 = (kk - 1)R_5, \quad R_4 = \frac{(1+kd)R_6}{kk\sqrt{L}} \quad (8-42)$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}, \quad C_1 = 2C_b, \quad C_2 = \frac{kdC_b}{2}$$

となります。

### 逆チェビシェフ 伝達関数

逆チェビシェフ B E フィルタの次数  $m$ 、中心周波数  $\omega_c$ 、阻止帯域幅  $B_w$ 、 $\omega_{s1}$  における減衰量  $atts(db)$

とするとき、 $l = \text{ceil}((double)(m-1)/2) - 1$  として

逆チェビシェフ B E フィルタの伝達関数は、

$m$  が奇数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L/N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{N/L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-46)$$

$m$  が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L/N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{N/L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-47)$$

(7-46)、(7-47) において

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{10^{atts/10} - 1}}$$

$$a_k = \frac{\pi(2k+1)}{2m} \quad k = 0, \dots, l$$

$$d = \frac{1}{m} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)$$

$$p_k = \frac{\sin(a_k) \sinh(d)}{1 + \sinh^2(d) - \sin^2(a_k)}$$

$$q_k = \frac{\cos(a_k) \cosh(d)}{\cosh^2(d) + \cos^2(a_k) - 1} \quad (7-48)$$

$$r_k = \cos(a_k)$$

$$\omega_{ck} = \sqrt{p_k^2 + q_k^2}$$

$$Q_k = \frac{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}{2p_k}$$

$$\omega_d = 1/\sinh(d)$$

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w}{(1+L)Q_k \omega_{ck}} \quad (7-49)$$

$$\begin{aligned}
 l_1 &= B_w^4 Q_k^2 + 8B_w^2 Q_k^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 - 4B_w^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 + 16Q_k^2 \omega_c^4 \omega_{ck}^4 \\
 l_2 &= B_w^2 Q_k^2 + 4Q_k^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 - 2\omega_c^2 \omega_{ck}^2 \\
 L &= \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2} \sqrt{l_2 + \sqrt{l_1} Q_k B_w + B_w^2 Q_k}}{4Q_k \omega_c^2 \omega_{ck}^2}
 \end{aligned} \tag{7-50}$$

$$\begin{aligned}
 n_1 &= B_w^2 r_k^2 + 4\omega_c^2 \\
 n_2 &= B_w^2 r_k^2 + 2\omega_c^2 \\
 N &= \frac{\sqrt{n_1} B_w r_k + n_2}{2\omega_c^2}
 \end{aligned} \tag{7-51}$$

$$\omega_{ra} = \sqrt{L} \omega_c, \quad \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L}, \quad \omega_{za} = \sqrt{N} \omega_c, \quad \omega_{zb} = \omega_c / \sqrt{N}, \quad G = r_k \omega_{ck} \sqrt{N/L}$$

(7-46)、(7-47) のカットオフ周波数 $\omega_{ra}$ の2次のハイパスフィルタの周波数無限大におけるゲインと、カットオフ周波数 $\omega_{rb}$ の2次のローパスフィルタのDCにおけるゲインは等しく、

$$A_2 = \sqrt{L/N} \tag{7-52}$$

となります。

1次の部分のBEフィルタの  $s=0, s=\infty$  におけるゲインは、1となります。



### 逆チェビシェフ R,C 素子値の決定

逆チェビシェフバンドエリミネーションフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

1 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) の後に、2 次のハイパスフィルタと 2 次のローパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

#### et1 を使用する場合、

逆チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L/N}(s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{N/L}(s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-46)$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

#### 1 次の回路の素子値決定

(7-46) の 1 次の部分と (2-5) より、

$R_b = Z$ ,  $Q_{be} = \omega_c / B_w$  とすると、

$$\frac{R_3}{R_2} = 1 \quad \therefore R_3 = R_2$$

$$\omega_c^2 = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} \dots \therefore R_2 = R_4$$

$$\frac{B_w}{\omega_d} = \frac{\omega_c}{\omega_d Q_{be}} = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_c \quad (8-43)$$

$$\therefore R_1 = \frac{R_4}{3\omega_d Q_{be} - 1}, \quad R_2 = R_3 = R_4$$

$$Q_{be} > \frac{1}{3\omega_d}$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}$$

## 2 次の回路の素子値決定

逆チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L/N}(s^2 + \omega_{za}^2) \sqrt{N/L}(s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{1}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-46)$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

(7-46) の 2 次の部分と (2-5) より、

1 番目の 2 次のハイパスフィルタ回路については、

$$\begin{aligned} \frac{R_3}{R_2} &= \sqrt{\frac{L}{N}} \quad \therefore R_3 = \sqrt{\frac{L}{N}} R_2 \\ \omega_{ra}^2 &= \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \dots \therefore \omega_{ra} = \frac{1}{C_b R_b} \\ \omega_{za}^2 &= \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{ra}^2 \dots \therefore R_2 = \frac{NR_4}{L} \\ K &= \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_{ra} \\ \therefore R_1 &= \frac{KR_4}{3\omega_{ra} - K}, \quad R_2 = \frac{NR_4}{L}, \quad R_3 = \sqrt{\frac{N}{L}} R_4 \\ \omega_{ra} &> \frac{K}{3} \\ R_b &= Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{ra}} \end{aligned} \quad (8-44)$$

2 番目の2次のローパスフィルタ回路については、同様に

$$\begin{aligned} \frac{R_3}{R_2} &= \sqrt{\frac{N}{L}} \quad \therefore R_3 = \sqrt{\frac{N}{L}} R_2 \\ \omega_{rb}^2 &= \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \dots \therefore \omega_{rb} = \frac{1}{C_b R_b} \\ \omega_{zb}^2 &= \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{rb}^2 \dots \therefore R_2 = \frac{L R_4}{N} \\ M &= \frac{3 R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3 R_1}{R_1 + R_4} \omega_{rb} \\ \therefore R_1 &= \frac{M R_4}{3 \omega_{rb} - M}, \quad R_2 = \frac{L R_4}{N}, \quad R_3 = \sqrt{\frac{L}{N}} R_4 \\ \omega_{rb} &> \frac{M}{3} \\ R_b &= Z, \quad C_b = \frac{1}{Z \omega_{rb}} \end{aligned} \quad (8-45)$$

et2 を使用する場合、

逆チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L/N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + K s + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{N/L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + M s + \omega_{rb}^2} \quad (7-46)$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

1 次の回路の素子値決定

(7-46) の 1 次の部分と (2-6) より、

$R_b = Z$ ,  $Q_{be} = \omega_c / B_w$  とすると、

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = 1 \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)R_6}{kk} \quad (8-46)$$

$$\omega_c^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \frac{1+kr}{1+kd} \quad (8-47)$$

$$\therefore kr = kd$$

$$\frac{B_w}{\omega_d} = \frac{\omega_c}{\omega_d Q_{be}} = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} = \frac{2kd+4-4kk}{1+kd} \omega_c$$

$$\therefore kk = \frac{(2\omega_d Q_{be} - 1)kd + 4\omega_d Q_{be} - 1}{4\omega_d Q_{be}} \quad (8-48)$$

$$kk > 1 \quad \therefore (2\omega_d Q_{be} - 1)kd > 1 \quad \therefore Q_{be} > \frac{\frac{1}{2\omega_d} + 1}{\frac{1}{2\omega_d}} \text{ を満たす } Q_{be} \text{ に対して、}$$

$$kd > \frac{1}{2\omega_d Q_{be} - 1} \quad (8-49)$$

を満たす、 $kd$  を選択すると、 $R_b = Z$  として、

$$Q_{be} > \frac{1}{2\omega_d}, \quad kd = kr > \frac{1}{2\omega_d Q_{be} - 1}, \quad kk = \frac{(2\omega_d Q_{be} - 1)kd + 4\omega_d Q_{be} - 1}{4\omega_d Q_{be}}$$

$$R_1 = \frac{Z}{2}, \quad R_2 = \frac{2Z}{kr}, \quad R_3 = (kk - 1)R_5, \quad R_4 = \frac{(1+kd)R_6}{kk} \quad (8-50)$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}, \quad C_1 = 2C_b, \quad C_2 = \frac{kdC_b}{2}$$

となります。

## 2 次の回路の素子値決定

逆チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L/N}(s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{N/L}(s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-46)$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

(7-46) の 2 次の部分と (2-6) より、

1 番目の 2 次のハイパスフィルタ回路については、

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = \sqrt{\frac{L}{N}} \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)}{kk} \sqrt{\frac{L}{N}} R_6 \quad (8-51)$$

$$\omega_{za}^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \therefore \omega_{za} = \frac{1}{C_b R_b} \quad (8-52)$$

$$\omega_{ra}^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \frac{1+kr}{1+kd} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{za}^2$$

$$\therefore kr = \frac{L(1+kd)}{N} - 1 > \frac{L}{N} - 1 \text{ に対して、} kd = \frac{N(1+kr)}{L} - 1 \quad (8-53)$$

$$K = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} = \frac{kd+kr+4-4kk}{1+kd} \omega_{za}$$

$$\therefore kk = \frac{kd+kr+4 - \frac{K(1+kd)}{\omega_{za}}}{4} \quad (8-54)$$

$$(8-53) \text{ を代入して、} kk > 1 \text{ より、} kr > \frac{(L-N)\omega_{za} + KN}{(L+N)\omega_{za} - KN} \quad (8-55)$$

従って、

$$kr > \max \left[ \left( \frac{L}{N} - 1 \right), \frac{(L-N)\omega_{za} + KN}{(L+N)\omega_{za} - KN} \right] \text{ に対して、}$$

$$kd = \frac{N(1+kr)}{L} - 1, \quad kk = \frac{kd+kr+4 - \frac{K(1+kd)}{\omega_{za}}}{4}$$

$$R_1 = \frac{Z}{2}, \quad R_2 = \frac{2Z}{kr}, \quad R_3 = (kk-1)R_5, \quad R_4 = \frac{(1+kd)}{kk} \sqrt{\frac{L}{N}} R_6 \quad (8-56)$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}, \quad C_1 = 2C_b, \quad C_2 = \frac{kdC_b}{2}$$

となります。

2 番目の2次のローパスフィルタ回路については、同様に

逆チェビシェフの伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L/N} (s^2 + \omega_{za}^2) \sqrt{N/L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{1}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-46)$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

(7-46) の2次の部分と (2-6) より、

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = \sqrt{\frac{N}{L}} \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)}{kk} \sqrt{\frac{N}{L}} R_6 \quad (8-57)$$

$$\omega_{zb}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \quad \therefore \omega_{zb} = \frac{1}{C_b R_b} \quad (8-58)$$

$$\omega_{rb}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \frac{1+kr}{1+kd} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{zb}^2$$

$$\therefore kd = \frac{L(1+kr)}{N} - 1 > \frac{L}{N} - 1 \text{ に対して、 } kr = \frac{N(1+kd)}{L} - 1 \quad (8-59)$$

$$M = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} = \frac{kd+kr+4-4kk}{1+kd} \omega_{zb}$$

$$\therefore kk = \frac{kd+kr+4 - \frac{M(1+kd)}{\omega_{zb}}}{4} \quad (8-60)$$

$$(8-59) \text{ を代入して、} kk > 1 \text{ より、} kd > \frac{(L-N)\omega_{zb} + K}{(L+N)\omega_{zb} - K} \quad (8-61)$$

従って、

$$kd > \max \left[ \left( \frac{L}{N} - 1 \right), \frac{(L-N)\omega_{zb} + K}{(L+N)\omega_{zb} - K} \right] \text{ に対して、}$$

$$kr = \frac{N(1+kd)}{L} - 1, \quad kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{M(1+kd)}{\omega_{zb}}}{4}$$

$$R_1 = \frac{Z}{2}, \quad R_2 = \frac{2Z}{kr}, \quad R_3 = (kk - 1)R_5, \quad R_4 = \frac{(1+kd)}{kk} \sqrt{\frac{N}{L}} R_6 \quad (8-62)$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}, \quad C_1 = 2C_b, \quad C_2 = \frac{kdC_b}{2}$$

となります。

# 楕円関数 伝達関数

**mが奇数の時**

$$B_w = \omega_{p2} - \omega_{p1}, \quad \omega_{p1}\omega_{p2} = \omega_{s1}\omega_{s2} = \omega_c^2$$

$$x_L = (\omega_{p2} - \omega_{p1}) / (\omega_{s2} - \omega_{s1}) = 1/k, \quad \omega_c = 2\pi f_c, \quad K = K(k)$$

として、

**mが奇数の時**

$$x_{z\nu} = sn(2\nu K/m) \quad (1-127a)$$

**mが偶数の時**

$$x_{z\nu} = sn[(2\nu-1)K/m] \quad (1-127b)$$

$$x_\nu = \frac{x_L}{x_{z\nu}} \quad (1-128)$$

$$C_1 = \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} \frac{1-x_\nu^2}{1-x_{z\nu}^2}, \quad C_2 = \prod_{\nu=1}^{m/2} \frac{1-x_\nu^2}{1-x_{z\nu}^2} \quad (1-129)$$

$$\varepsilon = \sqrt{10^{attp/10} - 1}, \quad L = \sqrt{(10^{atts/10} - 1) / (10^{attp/10} - 1)}, \quad m = \frac{K(k)K'(L^{-1})}{K'(k)K(L^{-1})} \quad (\text{切り上げ})$$

とする時、

**mが奇数の時**

$$H_m(\omega_p, s) = \frac{1}{C_H \sigma} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} \frac{\sqrt{\frac{L}{N}} \frac{x_\nu}{\sqrt{q_\nu}} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{\frac{N}{L}} \frac{x_\nu}{\sqrt{q_\nu}} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-55)$$

$$= \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} \frac{G(s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G \frac{N}{L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)}$$

$$G = \frac{x_\nu}{\sqrt{(m-1)C_H \sigma}} \sqrt{\frac{L}{q_\nu N}}$$

ただし、 $C_H$ 、 $\sigma$ 、 $p_\nu$ 、 $q_\nu$  は次式を満たすものとします。

$$\prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} [s^2 + x_\nu^2]^2 + \varepsilon^2 C_1^2 s^2 \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} [s^2 + x_{z\nu}^2]^2$$

$$= -C_H^2 (s^2 - \sigma^2) \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} [s^4 + (2q_\nu - p_\nu^2) s^2 + q_\nu^2]$$



**mが偶数の時**

$$H_m(\omega_p, s) = \frac{1}{C_H} \prod_{v=1}^{m/2} \frac{\sqrt{\frac{L}{N}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{\frac{N}{L}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-56)$$

$$= \prod_{v=1}^{m/2} \frac{G(s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{G \frac{N}{L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2}$$

$$G = \frac{x_v}{\sqrt[m]{C_H}} \sqrt{\frac{L}{q_v N}}$$

ただし、 $C_H$  ,  $p_v$  ,  $q_v$  は次式を満たすものとします。

$$\prod_{v=1}^{m/2} [s^2 + x_v^2]^2 + \varepsilon^2 C_2^2 \prod_{v=1}^{m/2} [s^2 + x_{zv}^2]^2$$

$$= C_H^2 \prod_{v=1}^{m/2} [s^4 + (2q_v - p_v^2)s^2 + q_v^2]$$

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w p_v}{(1+L)q_v} \quad (7-21)$$

$$l_1 = B_w^4 - 4B_w^2 p_v^2 \omega_c^2 + 8B_w^2 q_v \omega_c^2 + 16q_v^2 \omega_c^4$$

$$l_2 = B_w^2 - 2p_v^2 \omega_c^2 + 4q_v \omega_c^2$$

$$L = \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2} \sqrt{l_2 + \sqrt{l_1}} B_w + B_w^2}{4q_v \omega_c^2} \quad (7-22)$$

$$\omega_{ra} = \sqrt{L} \omega_c, \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L}$$

$$n_1 = B_w^2 + 4x_v^2 \omega_c^2, \quad n_2 = B_w^2 + 2x_v^2 \omega_c^2$$

$$N = \frac{\sqrt{n_1} B_w + n_2}{2x_v^2 \omega_c^2} \quad (7-24)$$

$$\omega_{za} = \sqrt{N} \omega_c, \omega_{zb} = \omega_c / \sqrt{N}$$

(7-55)、(7-56) のカットオフ周波数  $\omega_{ra}$  の2次のハイパスフィルタの周波数無限大におけるゲインと、カットオフ周波数  $\omega_{rb}$  の2次のローパスフィルタのDCにおけるゲインは等しく、

$$G = \frac{x_v}{(C_H \sigma)^{\frac{1}{\text{int}(m/2)*2}}} \sqrt{\frac{L}{q_v N}} \dots \dots m = \text{even} \quad (7-57)$$

$$G = \frac{x_v}{(C_H)^{\frac{1}{\text{int}(m/2)*2}}} \sqrt{\frac{L}{q_v N}} \dots \dots m = \text{odd}$$

$$\omega_{ra} = \sqrt{L} \omega_c, \quad \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L}, \quad \omega_{za} = \sqrt{N} \omega_c, \quad \omega_{zb} = \omega_c / \sqrt{N}, \quad G = r_k \omega_{ck} \sqrt{N/L}$$

### 楕円関数 R,C 素子値の決定

楕円関数バンドエリミネーションフィルタの構成は、

フィルタの次数が奇数の場合は、

1 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) の後に、2 次のハイパスフィルタと 2 次のローパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

#### et1 を使用する場合、

楕円関数の伝達関数は次式で示されます。

$$\begin{aligned}
 H_m(\omega_p, s) &= \frac{1}{C_H \sigma} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{\sqrt{\frac{L}{N}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{\frac{N}{L}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \\
 &= \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G(s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G \frac{N}{L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \\
 G &= \frac{x_v}{\sqrt{(m-1) C_H \sigma}} \sqrt{\frac{L}{q_v N}}
 \end{aligned} \tag{7-55}$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \tag{2-5}$$

#### 1 次の回路の素子値決定

(7-55) の 1 次の部分と (2-5) より、

$$R_b = Z, \quad Q_{be} = \omega_c / B_w \text{ とすると、}$$

$$\frac{R_3}{R_2} = 1 \quad \therefore R_3 = R_2$$

$$\omega_c^2 = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} \dots \therefore R_2 = R_4$$

$$\frac{B_w}{\sigma} = \frac{\omega_c}{\sigma Q_{be}} = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_c \tag{8-63}$$

$$\therefore R_1 = \frac{R_4}{3\sigma Q_{be} - 1}, \quad R_2 = R_3 = R_4$$

$$Q_{be} > \frac{1}{3\sigma}$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}$$

## 2 次の回路の素子値決定

楕円関数の伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_p, s) = \frac{1}{C_H \sigma} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{\sqrt{\frac{L}{N}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{\frac{N}{L}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-55)$$

$$= \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G(s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G \frac{N}{L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)}$$

$$G = \frac{x_v}{\sqrt{(m-1)} C_H \sigma} \sqrt{\frac{L}{q_v N}}$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

(7-55) の 2 次の部分と (2-5) より、  
1 番目の 2 次のハイパスフィルタ回路については、

$$\begin{aligned}\frac{R_3}{R_2} &= G \quad \therefore R_3 = GR_2 \\ \omega_{ra}^2 &= \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \cdots \cdots \cdots \therefore \omega_{ra} = \frac{1}{C_b R_b} \\ \omega_{za}^2 &= \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{ra}^2 \cdots \cdots \therefore R_2 = \frac{NR_4}{L} \\ K &= \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_{ra} \quad (8-64) \\ \therefore R_1 &= \frac{KR_4}{3\omega_{ra} - K}, \quad R_2 = \frac{NR_4}{L}, \quad R_3 = \frac{GNR_4}{L} \\ \omega_{ra} &> \frac{K}{3} \\ R_b &= Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{ra}}\end{aligned}$$

2 番目の 2 次のローパスフィルタ回路については、同様に  
楕円関数の伝達関数は次式で示されます。

$$\begin{aligned}H_m(\omega_p, s) &= \frac{1}{C_H \sigma} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{\sqrt{\frac{L}{N}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{\frac{N}{L}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-55) \\ &= \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G(s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G \frac{N}{L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \\ G &= \frac{x_v}{\sqrt{(m-1)C_H \sigma}} \sqrt{\frac{L}{q_v N}}\end{aligned}$$

et1 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = \frac{R_3}{R_2} \frac{s^2 + \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4}}{s^2 + \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} s + \frac{1}{C_b^2 R_b^2}} \quad (2-5)$$

(7-55) の 2 次の部分と (2-5) より、

$$\begin{aligned}\frac{R_3}{R_2} &= \frac{GN}{L} \quad \therefore R_3 = \frac{GN}{L} R_2 \\ \omega_{rb}^2 &= \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \cdots \therefore \omega_{rb} = \frac{1}{C_b R_b} \\ \omega_{zb}^2 &= \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{rb}^2 \cdots \therefore R_2 = \frac{LR_4}{N} \\ M &= \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_{rb} \\ \therefore R_1 &= \frac{MR_4}{3\omega_{rb} - M}, \quad R_2 = \frac{LR_4}{N}, \quad R_3 = GR_4 \\ \omega_{rb} &> \frac{M}{3} \\ R_b &= Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{rb}}\end{aligned}\tag{8-65}$$

et2 を使用する場合、

楕円関数の伝達関数は次式で示されます。

$$\begin{aligned}H_m(\omega_p, s) &= \frac{1}{C_H \sigma} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{\sqrt{\frac{L}{N}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{\frac{N}{L}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \\ &= \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G(s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G \frac{N}{L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)} \\ G &= \frac{x_v}{\sqrt{(m-1)C_H \sigma}} \sqrt{\frac{L}{q_v N}}\end{aligned}\tag{7-55}$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)}}\tag{2-6}$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

### 1 次の回路の素子値決定

(7-55) の 1 次の部分と (2-6) より、

$R_b = Z$ ,  $Q_{be} = \omega_c / B_w$  とすると、

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = 1 \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)R_6}{kk} \quad (8-66)$$

$$\omega_c^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \frac{1+kr}{1+kd} \quad (8-67)$$

$$\therefore kr = kd$$

$$\frac{B_w}{\sigma} = \frac{\omega_c}{\sigma Q_{be}} = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} = \frac{2kd+4-4kk}{1+kd} \omega_c \quad (8-68)$$

$$\therefore kk = \frac{(2\sigma Q_{be} - 1)kd + 4\sigma Q_{be} - 1}{4\sigma Q_{be}}$$

$$kk > 1 \quad \therefore (2\sigma Q_{be} - 1)kd > 1 \quad \therefore Q_{be} > \frac{\frac{1}{kd} + 1}{2\sigma} > \frac{1}{2\sigma} \text{ を満たす } Q_{be} \text{ に対して、}$$

$$kd > \frac{1}{2\sigma Q_{be} - 1} \quad (8-69)$$

を満たす、 $kd$  を選択すると、 $R_b = Z$  として、

$$Q_{be} > \frac{1}{2\sigma}, \quad kd = kr > \frac{1}{2\sigma Q_{be} - 1}, \quad kk = \frac{(2\sigma Q_{be} - 1)kd + 4\sigma Q_{be} - 1}{4\sigma Q_{be}}$$

$$R_1 = \frac{Z}{2}, \quad R_2 = \frac{2Z}{kr}, \quad R_3 = (kk - 1)R_5, \quad R_4 = \frac{(1+kd)R_6}{kk} \quad (8-70)$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}, \quad C_1 = 2C_b, \quad C_2 = \frac{kdC_b}{2}$$

となります。

## 2 次の回路の素子値決定

楕円関数の伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_p, s) = \frac{1}{C_H \sigma} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{\sqrt{\frac{L}{N}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{\frac{N}{L}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-55)$$

$$= \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G(s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G \frac{N}{L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)}$$

$$G = \frac{x_v}{\sqrt{(m-1) C_H \sigma}} \sqrt{\frac{L}{q_v N}}$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

(7-55) の 2 次の部分と (2-6) より、

1 番目の 2 次のハイパスフィルタ回路については、

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = G \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)}{kk} G R_6 \quad (8-71)$$

$$\omega_{za}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \quad \therefore \omega_{za} = \frac{1}{C_b R_b} \quad (8-72)$$

$$\omega_{ra}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \frac{1+kr}{1+kd} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{za}^2$$

$$\therefore kr = \frac{L(1+kd)}{N} - 1 > \frac{L}{N} - 1 \text{ に対して、} kd = \frac{N(1+kr)}{L} - 1 \quad (8-73)$$

$$K = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} = \frac{kd+kr+4-4kk}{1+kd} \omega_{za}$$

$$\therefore kk = \frac{kd+kr+4 - \frac{K(1+kd)}{\omega_{za}}}{4} \quad (8-74)$$

$$(8-73) \text{ を代入して、 } kk > 1 \text{ より、 } kr > \frac{(L-N)\omega_{za} + KN}{(L+N)\omega_{za} - KN} \quad (8-75)$$

従って、

$$kr > \max \left[ \left( \frac{L}{N} - 1 \right), \frac{(L-N)\omega_{za} + KN}{(L+N)\omega_{za} - KN} \right] \text{ に対して、}$$

$$\begin{aligned} kd &= \frac{N(1+kr)}{L} - 1, \quad kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{K(1+kd)}{\omega_{za}}}{4} \\ R_1 &= \frac{Z}{2}, \quad R_2 = \frac{2Z}{kr}, \quad R_3 = (kk-1)R_5, \quad R_4 = \frac{(1+kd)}{kk} GR_6 \\ R_b &= Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}, \quad C_1 = 2C_b, \quad C_2 = \frac{kdC_b}{2} \end{aligned} \quad (8-76)$$

となります。



2 番目の2次のローパスフィルタ回路については、同様に  
楕円関数の伝達関数は次式で示されます。

$$H_m(\omega_p, s) = \frac{1}{C_H \sigma} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{\sqrt{\frac{L}{N}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{\frac{N}{L}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-55)$$

$$= \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G(s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G \frac{N}{L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)}$$

$$G = \frac{x_v}{\sqrt{(m-1)} C_H \sigma} \sqrt{\frac{L}{q_v N}}$$

et2 の伝達関数は、

$$H_2(\omega_p, s) = -\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \frac{s^2 + \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2}{s^2 + \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} s + \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)}} \quad (2-6)$$

$$R1 = \frac{Rb}{2}, C1 = 2 \cdot Cb, R2 = \frac{2 \cdot Rb}{kr}, C2 = \frac{kd \cdot Cb}{2}, R3 = (kk - 1) \cdot R5$$

(7-55) の2次の部分と (2-6) より、

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = \frac{GN}{L} \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)}{kk} \frac{GN}{L} R_6 \quad (8-77)$$

$$\omega_{zb}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \quad \therefore \omega_{zb} = \frac{1}{C_b R_b} \quad (8-78)$$

$$\omega_{rb}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \frac{1+kr}{1+kd} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{zb}^2$$

$$\therefore kd = \frac{L(1+kr)}{N} - 1 > \frac{L}{N} - 1 \text{ に対して、 } kr = \frac{N(1+kd)}{L} - 1 \quad (8-79)$$

$$M = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} = \frac{kd+kr+4-4kk}{1+kd} \omega_{zb}$$

$$\therefore kk = \frac{kd+kr+4 - \frac{M(1+kd)}{\omega_{zb}}}{4} \quad (8-80)$$

$$(8-79) \text{ を代入して、 } kk > 1 \text{ より、 } kd > \frac{(L-N)\omega_{zb} + K}{(L+N)\omega_{zb} - K} \quad (8-81)$$

従って、

$$kd > \max \left[ \left( \frac{L}{N} - 1 \right), \frac{(L-N)\omega_{zb} + K}{(L+N)\omega_{zb} - K} \right] \text{ に対して、}$$

$$kr = \frac{N(1+kd)}{L} - 1, \quad kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{M(1+kd)}{\omega_{zb}}}{4}$$

$$R_1 = \frac{Z}{2}, \quad R_2 = \frac{2Z}{kr}, \quad R_3 = (kk - 1)R_5, \quad R_4 = \frac{(1+kd)}{kk} \frac{GN}{L} R_6 \quad (8-82)$$

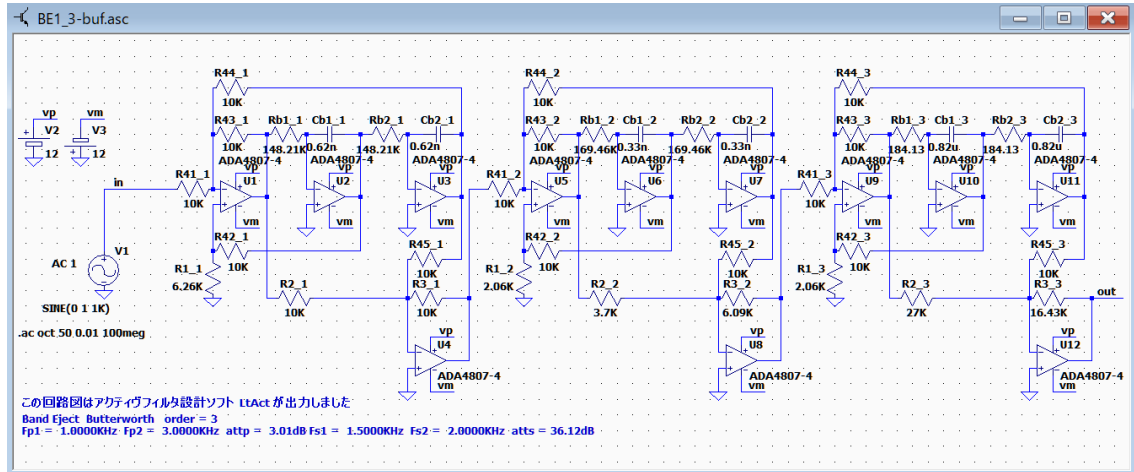
$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}, \quad C_1 = 2C_b, \quad C_2 = \frac{kdC_b}{2}$$

となります。

## バンドエリミネーションフィルタ BE1 と BE2 の計算マクロ

バターワース、(逆) チェビシェフ、楕円関数のバンドエリミネーションフィルタのマクロ

## et1 を使用する場合 (BE1)



et1zr Z=Rb と R=R4 を与えて、BE1 を計算する

バターワース、(逆) チェビシェフ、楕円関数用

$$rb=Z/r4=R/wc=\sqrt{p1}; Q=wc/p0; FSF=wc/r1=R/(3*Q-1);$$

$$R3=p4*R/p1; R2=R3/p2; cb=1/(Z*FSF);$$

$$z=169.4587 \text{ K}; R=10 \text{ k}; p0=9.1701 \text{ K}; p1=319.7748 \text{ Meg}; p2=1.6432;$$

$$p4=194.6089 \text{ Meg}; \text{\$et1zr}$$

$$\rightarrow Rb=169.4587 \text{ k} \quad Cb=0.3300000545 \text{ n}$$

$$R1=2.061778737 \text{ k} \quad R2=3.703633772 \text{ k} \quad R3=6.085811015 \text{ k} \quad R4=10 \text{ k}$$

et1cr C=Cb と R=R4 を与えて、BE1 を計算する

バターワース、(逆) チェビシェフ、楕円関数用

$$cb=C/r4=R/wc=\sqrt{p1}; Q=wc/p0; FSF=wc/r1=R/(3*Q-1);$$

$$R3=p4*R/p1; R2=R3/p2; rb=1/(C*FSF)$$

$$c=0.3300000545 \text{ n}; R=10 \text{ k}; p0=9.1701 \text{ K}; p1=319.7748 \text{ Meg}; p2=1.6432;$$

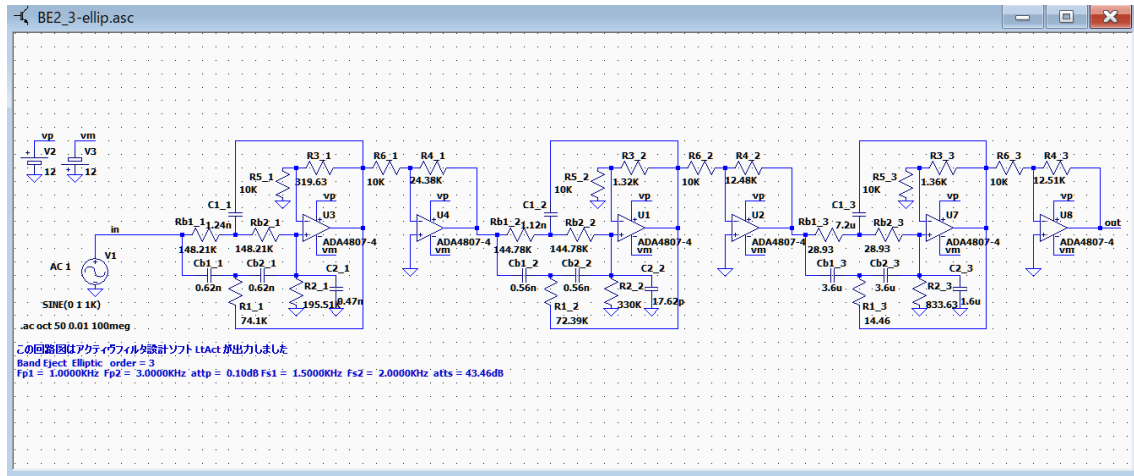
$$p4=194.6089 \text{ Meg}; \text{\$et1cr}$$

$$\rightarrow Rb=169.4587 \text{ k} \quad Cb=0.3300000545 \text{ n}$$

$$R1=2.061778737 \text{ k} \quad R2=3.703633772 \text{ k} \quad R3=6.085811015 \text{ k} \quad R4=10 \text{ k}$$

バンドエリミネーションフィルタ BE1 と BE2 の計算マクロ

## et2 を使用する場合 (BE2)



et2zkr Z(Rb)と R(2Rb/R2)を与えて、BE2 を計算する

バターワース、(逆) チェビシェフ、楕円関数用

$wc = \sqrt{p1}$ ;  $Q = \sqrt{p1}/p0$ ;  $FSF = \sqrt{p1/p2}$ ;  $Rb = Z$ ;  $R2 = 2 \cdot Rb / kr$ ;  $R5 = 10 \text{ k}$ ;  $R6 = 10 \text{ k}$ ;  
 $kd = (1 + kr - p2)/p2$ ;  $Cb = 1/(Z \cdot FSF)$ ;  $kk = (kd + kr + 4 \cdot (\sqrt{p2} \cdot (1 + kd)/Q))/4$ ;  $R3 = (kk - 1) \cdot R5$ ;  
 $R4 = (1 + kr)/kk \cdot R6$ ;  $C1 = 2 \cdot Cb$ ;  $C2 = kd \cdot Cb/2$ ;

$z = 144.7803 \text{ K}$ ;  $kr = 2 \cdot 144.7803 \text{ K}/(330.0000 \text{ K})$ ;  $p0 = 4.7893 \text{ K}$ ;

$p1 = 268.7015 \text{ Meg}$ ;  $p2 = 1.3290$ ;  $p4 = 202.1797 \text{ Meg}$ ; \$et2zkr

→  $Rb = 144.7803 \text{ k}$   $Cb = 0.5599951225 \text{ n}$   $C1 = 1.119990245 \text{ n}$   $C2 = 17.62549803 \text{ p}$

$R1 = 72.39015 \text{ k}$   $R2 = 330.000 \text{ k}$   $R3 = 1.319159171 \text{ k}$   $R4 = 12.4802 \text{ k}$

et2ckr C(Cb)と R(2Rb/R2)を与えて、BE2 を計算する

バターワース、(逆) チェビシェフ、楕円関数用

$wc = \sqrt{p1}$ ;  $Q = \sqrt{p1}/p0$ ;  $FSF = \sqrt{p1/p2}$ ;  $Cb = C$ ;  $R = 1/(C \cdot FSF)$ ;  $Rb = R$ ;  $R2 = 2 \cdot Rb / kr$ ;  
 $R5 = 10 \text{ k}$ ;  $R6 = 10 \text{ k}$ ;  $kd = (1 + kr - p2)/p2$ ;  $kk = (kd + kr + 4 \cdot (\sqrt{p2} \cdot (1 + kd)/Q))/4$ ;  
 $R3 = (kk - 1) \cdot R5$ ;  $R4 = (1 + kr)/kk \cdot R6$ ;  $C1 = 2 \cdot Cb$ ;  $C2 = kd \cdot Cb/2$ ;

$c = 0.5599951225 \text{ n}$ ;  $kr = 2 \cdot 144.7803 \text{ K}/(330.0000 \text{ K})$ ;  $p0 = 4.7893 \text{ K}$ ;

$p1 = 268.7015 \text{ Meg}$ ;  $p2 = 1.3290$ ;  $p4 = 202.1797 \text{ Meg}$ ; \$et2ckr

→  $Rb = 144.7803 \text{ k}$   $Cb = 0.5599951225 \text{ n}$   $C1 = 1.119990245 \text{ n}$   $C2 = 17.62549803 \text{ p}$

$R1 = 72.39015 \text{ k}$   $R2 = 330.000 \text{ k}$   $R3 = 1.319159171 \text{ k}$   $R4 = 12.4802 \text{ k}$

伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ローパスフィルタ LP1 と LP2 の計算マクロ

## 伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

LtAct が出力したフィルタの伝達関数の係数または LtAct のアルゴリズムに従って計算された係数から回路図の素子値を計算するマクロの紹介

### ローパスフィルタ LP1 と LP2 の計算マクロ

lp1 の計算マクロ（1 次のローパスフィルタ）

3 次バターワースローパスフィルタ LP1\_3-but.asc での使用例

#### 伝達関数の係数

1 次式

$$P0 = 6.2832 \text{ K} \quad P1 = 0 \quad P2 = 6.2832 \text{ K}$$

#### 回路図の R と C の値

$$1(\text{lp1}) \text{ R1\_1} = 159.1549 \text{ K} \quad \text{C1\_1} = 1.0000 \text{ n}$$

#### マクロと入力例

slpz Z=R1 を与えて lp1 を計算する バターワースとチェビシェフの 1 次フィルタ

$$r1 = z; c1 = 1 / (p0 * z)$$

$$z = 159.1549 \text{ K}; P0 = 6.2832 \text{ K}; p2 = 6.2832 \text{ K}; \$\text{slpz} \rightarrow C1 = 1 \text{ n が得られます。}$$

注意：z=10.2611 K のように数字と単位の間スペースを入れる。

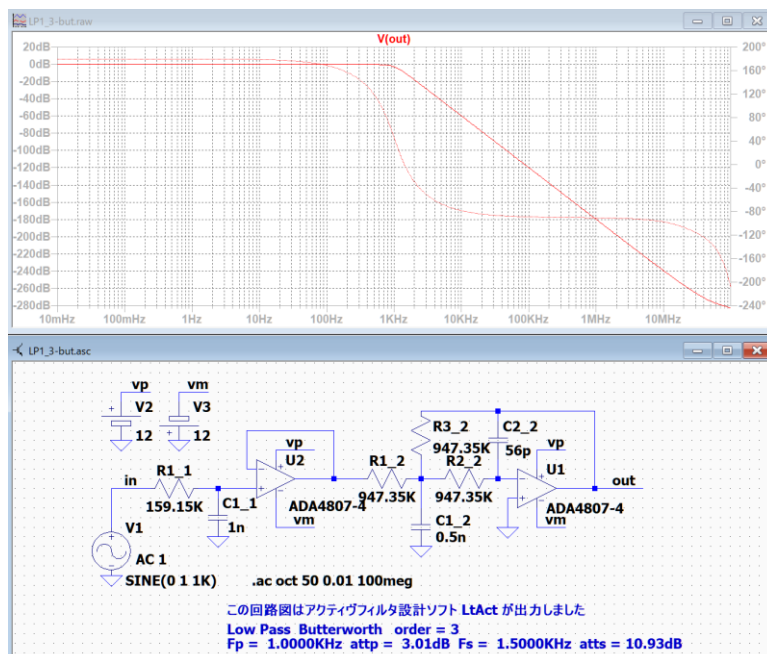
単位の後ろにスペースを入れない。マクロも同様。

「電卓プログラム Dt\_.exe」はスペースを「\*」と認識するので構文エラーになる。

slpc C=C1 を与えて lp1 を計算する バターワースとチェビシェフの 1 次フィルタ

$$c1 = c; r1 = 1 / (p0 * z)$$

$$c = 1 \text{ n}; P0 = 6.2832 \text{ K}; p2 = 6.2832 \text{ K}; \$\text{slpc} \rightarrow R1 = 159.1549 \text{ K が得られます。}$$



伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ローパスフィルタ LP1 と LP2 の計算マクロ

3 次チェビシェフローパスフィルタ LP2\_3-chev.asc での使用例

### 伝達関数の係数

1 次式

$$P0 = 6.0910 \text{ K} \quad P1 = 0 \quad P2 = 6.0910 \text{ K}$$

### 回路図の R と C の値

$$1(\text{lp1}) \text{ R1\_1} = 16.4178 \text{ K} \quad \text{C1\_1} = 10.0000 \text{ n}$$

### マクロと入力例

**slpz** Z=R1 を与えて lp1 を計算する バターワースとチェビシェフの 1 次フィルタ

$$r1 = z; c1 = 1/(p0 * z)$$

$$z = 16.4178 \text{ K}; P0 = 6.0910 \text{ K}; p2 = 6.0910 \text{ K}; \$\text{slpz}$$

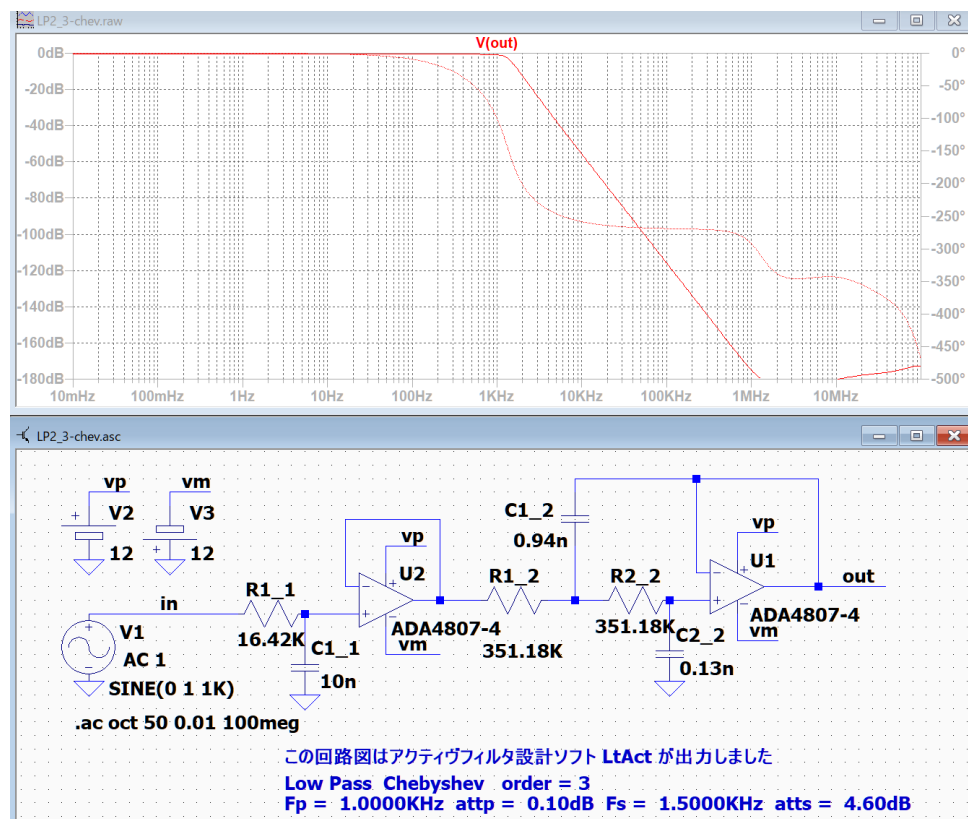
→ R1=16.4178 K C1 = 10 n が得られます。

**slpc** C=C1 を与えて lp1 を計算する バターワースとチェビシェフの 1 次フィルタ

$$c1 = c; r1 = 1/(p0 * z)$$

$$c = 10 \text{ n}; P0 = 6.0910 \text{ K}; p2 = 6.0910 \text{ K}; \$\text{slpc}$$

→ R1=16.4178 K C1 = 10 n が得られます。



伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ローパスフィルタ LP1 と LP2 の計算マクロ

### LP1 の計算マクロ (2 次のローパスフィルタ)

3 次バターワースローパスフィルタ LP1\_3-but.asc での使用例

#### 伝達関数の係数

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	6.2832K	39.4784Meg	0	0	39.4784Meg

#### 回路図の R と C の値

2 (LP1) 「LP1-0-2」 C1\_2 = 0.5040 n C2\_2 = 56.0000 p

R1\_2 = R2\_2 = R3\_2 = 947.3509 K

lp1z Z=R1 を与えて LP1 を計算する バターワースとチェビシェフ用

$wc = \sqrt{p_4}$ ;  $Q = wc/p_0$ ;  $mm = 9 * Q * Q$ ;  $kk = 1$ ;  $FSF = \sqrt{mm * kk} * wc$ ;  $R1 = z$ ;  $R3 = z$ ;

$R2 = kk * z$ ;  $c = 1/(z * FSF)$ ;  $c1 = mm * c$ ;  $C2 = c$ ;

$z = 947.3509 \text{ K}$ ;  $p_0 = 6.2832 \text{ K}$ ;  $p_1 = 39.4784 \text{ Meg}$ ;  $p_4 = 39.4784 \text{ Meg}$ ; \$lp1z

→ R1=R2=R3=947.3509 K C1=0.5039987958 n C2=56.00015307 p が得られます。

lp1c C=C2 を与えて LP1 を計算する バターワースとチェビシェフ用

$wc = \sqrt{p_4}$ ;  $Q = wc/p_0$ ;  $mm = 9 * Q * Q$ ;  $kk = 1$ ;  $FSF = \sqrt{mm * kk} * wc$ ;  $z = 1/(c * FSF)$ ;  $R1 = z$ ;  $R3 = z$ ;  $R2 = kk * z$ ;

$c2 = c$ ;  $c1 = c * mm$ ;

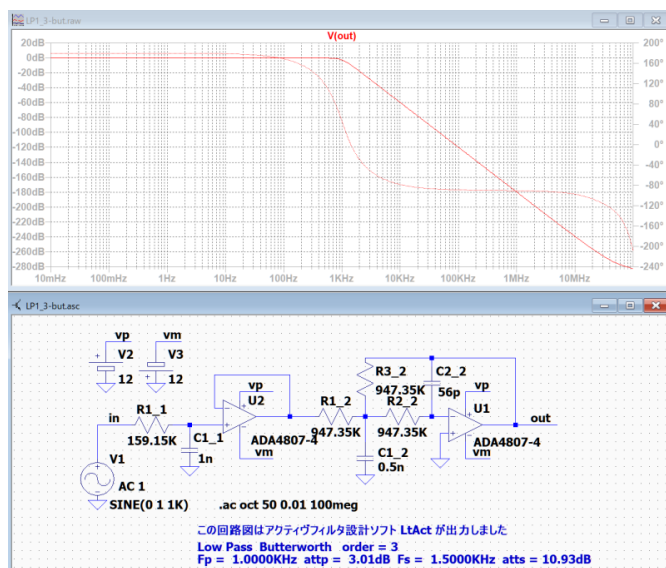
$c = 56.00015307 \text{ p}$ ;  $p_0 = 6.2832 \text{ K}$ ;  $p_1 = 39.4784 \text{ Meg}$ ;  $p_4 = 39.4784 \text{ Meg}$ ; \$lp1c

→ R1=R2=R3=947.3509 K C1=0.5039987958 n C2=56.00015307 p が得られます。

R1=100K にしたい場合は、

$z = 100 \text{ K}$ ;  $p_0 = 6.2832 \text{ K}$ ;  $p_1 = 39.4784 \text{ Meg}$ ;  $p_4 = 39.4784 \text{ Meg}$ ; \$lp1z

→ R1=R2=R3=100 K C1= 4.774637128 n C2=0.5305179541 n が得られます。



伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ローパスフィルタ LP1 と LP2 の計算マクロ

### LP2 の計算マクロ (2 次のローパスフィルタ)

3 次チェビシェフローパスフィルタ LP2\_3-chev.asc での使用例

#### 伝達関数の係数

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	6.0910K	66.7086Meg	0	0	66.7086Meg

#### 回路図の R と C の値

2 (LP2) 「LP2-0-2」 C1\_2 = 0.9350 n C2\_2 = 0.1300 n

R1\_2 = R2\_2 = 351.1806 K

lp2z Z=R1 を与えて LP2 を計算する バターワースとチェビシェフ用

$wc = \sqrt{p_4}$ ;  $Q = wc/p_0$ ;  $mm = 4 * Q * Q$ ;  $kk = 1$ ;  $FSF = \sqrt{mm * kk} * wc$ ;  $R1 = z$ ;  $R2 = kk * z$ ;  
 $c = 1/(z * FSF)$ ;  $C2 = c$ ;  $c1 = mm * c$ ;

$z = 351.1806 \text{ K}$ ;  $P0 = 6.0910 \text{ K}$ ;  $p1 = 66.7086 \text{ Meg}$ ;  $p4 = 66.7086 \text{ Meg}$ ; \$lp2z

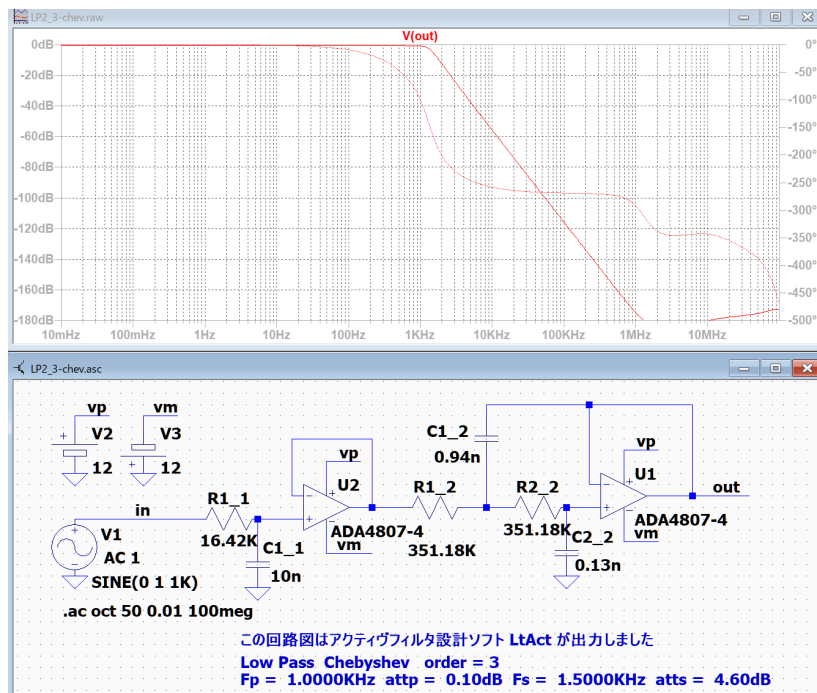
→ R1=R2=351.1806 K C1=0.9349984258 n C2= 0.1300008707 n が得られます。

lp2c C=C2 を与えて LP2 を計算する バターワースとチェビシェフ用

$wc = \sqrt{p_4}$ ;  $Q = wc/p_0$ ;  $mm = 4 * Q * Q$ ;  $kk = 1$ ;  $FSF = \sqrt{mm * kk} * wc$ ;  $z = 1/(c * FSF)$ ;  $R1 = z$ ;  $R2 = z$ ;  
 $C2 = c$ ;  $c1 = mm * c$ ;

$c = 0.1300008707 \text{ n}$ ;  $P0 = 6.0910 \text{ K}$ ;  $p1 = 66.7086 \text{ Meg}$ ;  $p4 = 66.7086 \text{ Meg}$ ; \$lp2c

→ R1=R2=351.1806 K C1=0.9349984258 n C2= 0.1300008707 n が得られます。





伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ローパスフィルタ LP3 と LP4 の計算マクロ

## ローパスフィルタ LP3 と LP4 の計算マクロ

### et1 使用 逆チェビシェフローパスフィルター

フィルタの次数が奇数の時は、1 次フィルタの計算には **slpz** または **slpc** を使用する。

**注意:** 基本回路 et1 と et2 は逆チェビシェフまたは楕円関数のローパスフィルタ、ハイパスフィルタ、バンドパスフィルタおよびバンドエリミネーションフィルタに使われます。

伝達関数から素子値に変換するマクロは同じものが利用できます。

基本回路 et1 を使う場合は、(LP3, HP3, BP3, ET1)

et1zr(Z=Rb と R=R4 を与える)または et1cr(C=Cb と R=R4 を与える)が利用できます。

基本回路 et2 を使う場合は、(LP4, HP4, BP4, ET2)

et2zkr(Z=Rb と  $Kr=2 \cdot Rb/R2$  を与える)または et2ckr(C=Cb と  $Kr=2 \cdot Rb/R2$  を与える)が利用できます。

### et1 使用 逆チェビシェフローパスフィルター

3 次逆チェビシェフローパスフィルタ LP3\_3-inv.asc での使用例

#### 伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	4.0254K	99.0630Meg	0.8364	0	99.0630Meg

#### 回路図の R と C の値

2 (et1) 「LP3-0-1」 Rb\_2(2 個)=1.7941 K Cb\_2(2 個)= 56.0000 n

2 R1\_2=1.5582 K R2\_2=11.9555 K R3\_2=10.0000 K R4\_2(5 個)= 10.0000K

et1zr Z=Rb と R=R4 を与えて、LP3 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

rb=Z;r4=R;wc=sqrt(p1);Q=wc/p0;FSF=wc;r1=R/(3\*Q-1);R3=p4\*R/p1;R2=R3/p2; cb=1/(Z\*FSF);

**z=1.7941 k;R=10 K;p0=4.0254 K;p1=99.0630 Meg;p2=0.8364;p4=99.0630 Meg;\$et1zr**

→ Rb=1.7941 k Cb=56.00123644 n R1=1.5582 K R2=11.9555 K R3=10.0000 K

R4=10K が得られます。

et1cr Cb=CZ と R4=R を与えて、LP3 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

cb=C;r4=R;wc=sqrt(p1);Q=wc/p0;FSF=wc;r1=R/(3\*Q-1);R3=p4\*R/p1;R2=R3/p2; rb=1/(C\*FSF);

伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

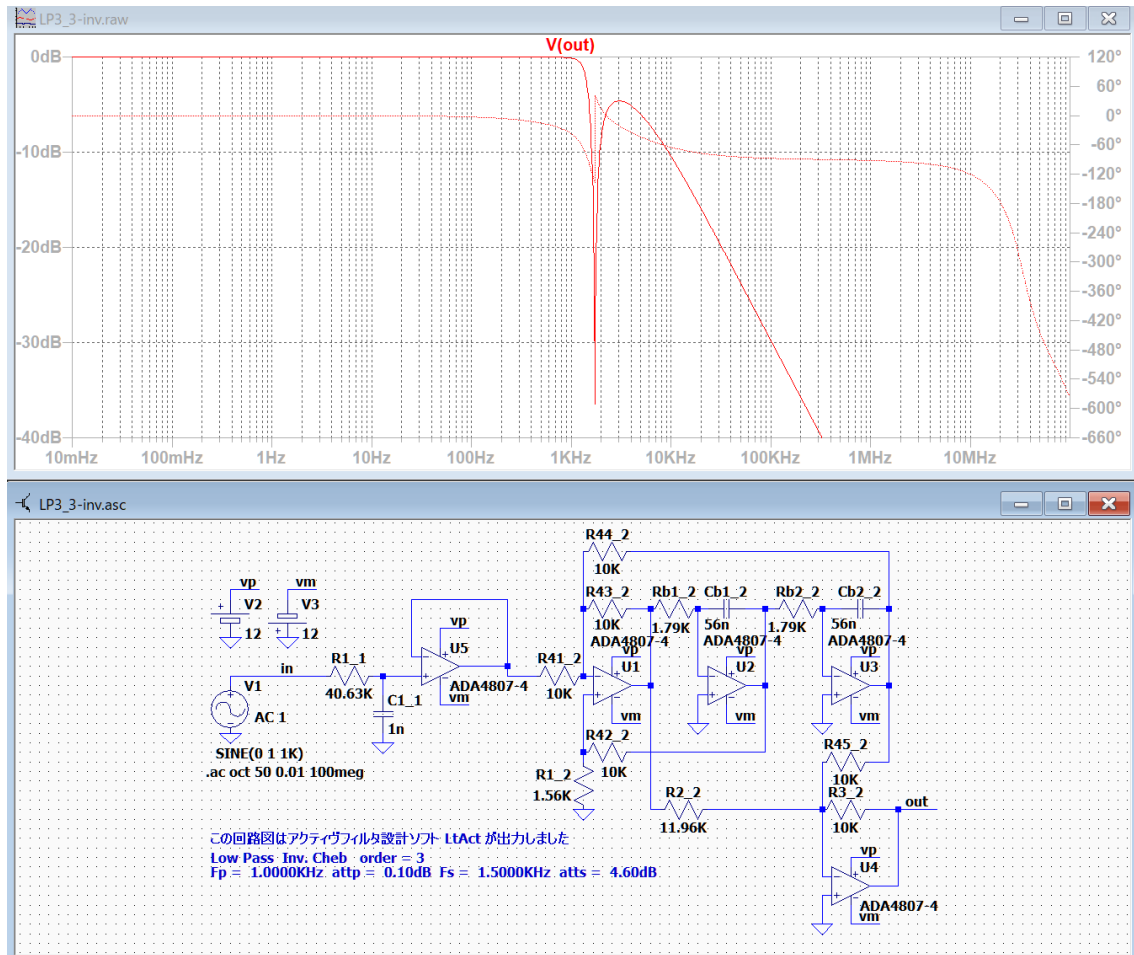
ローパスフィルタ LP3 と LP4 の計算マクロ

$c=56.00123644 \text{ n}; R=10 \text{ k}; p_0=4.0254 \text{ K}; p_1=99.0630 \text{ Meg}; p_2=0.8364$

$p_4=99.0630 \text{ Meg}; \$et1cr$

→  $R_b=1.7941 \text{ k}$   $C_b=56.00123644 \text{ n}$   $R_1=1.5582 \text{ K}$   $R_2=11.9555 \text{ K}$   $R_3=10.0000 \text{ K}$

$R_4=10 \text{ K}$  が得られます。



### et1 使用 楕円関数ローパスフィルタ

マクロの使用方法は逆チェビシェフローパスフィルタの場合と同じ。

3 次楕円関数ローパスフィルタ LP3\_3-ellip.asc での使用例

伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	3.6398K	61.3446Meg	0.5538	0	61.3446Meg

回路図の R と C の値

2 (et1) 「LP3-0-1」  $R_{b\_2}$ (2 個)= 1.7024 K  $C_{b\_2}$ (2 個)=75.0000 n

$R_{1\_2}=1.8330 \text{ K}$   $R_{2\_2}=18.0582 \text{ K}$   $R_{3\_2}=10.0000 \text{ K}$   $R_{4\_2}$ (5 個)= 10.0000K

伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ローパスフィルタ LP3 と LP4 の計算マクロ

et1zr Z=Rb と R=R4 を与えて、LP3 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

rb=Z;r4=R;wc=sqrt(p1);Q=wc/p0;FSF=wc;r1=R/(3\*Q-1);R3=p4\*R/p1;R2=R3/p2; cb=1/(Z\*FSF);

z=1.7024 K;R=10 k;p0=3.6398 K;p1=61.3446 Meg;p2=0.5538;p4=61.3446 Meg;\$et1zr

→ Rb=1.7024 K Cb=74.99809288 n R1=1833.002477 k R2=18.05706031 k

R3=10 k R4=10 k が得られます。

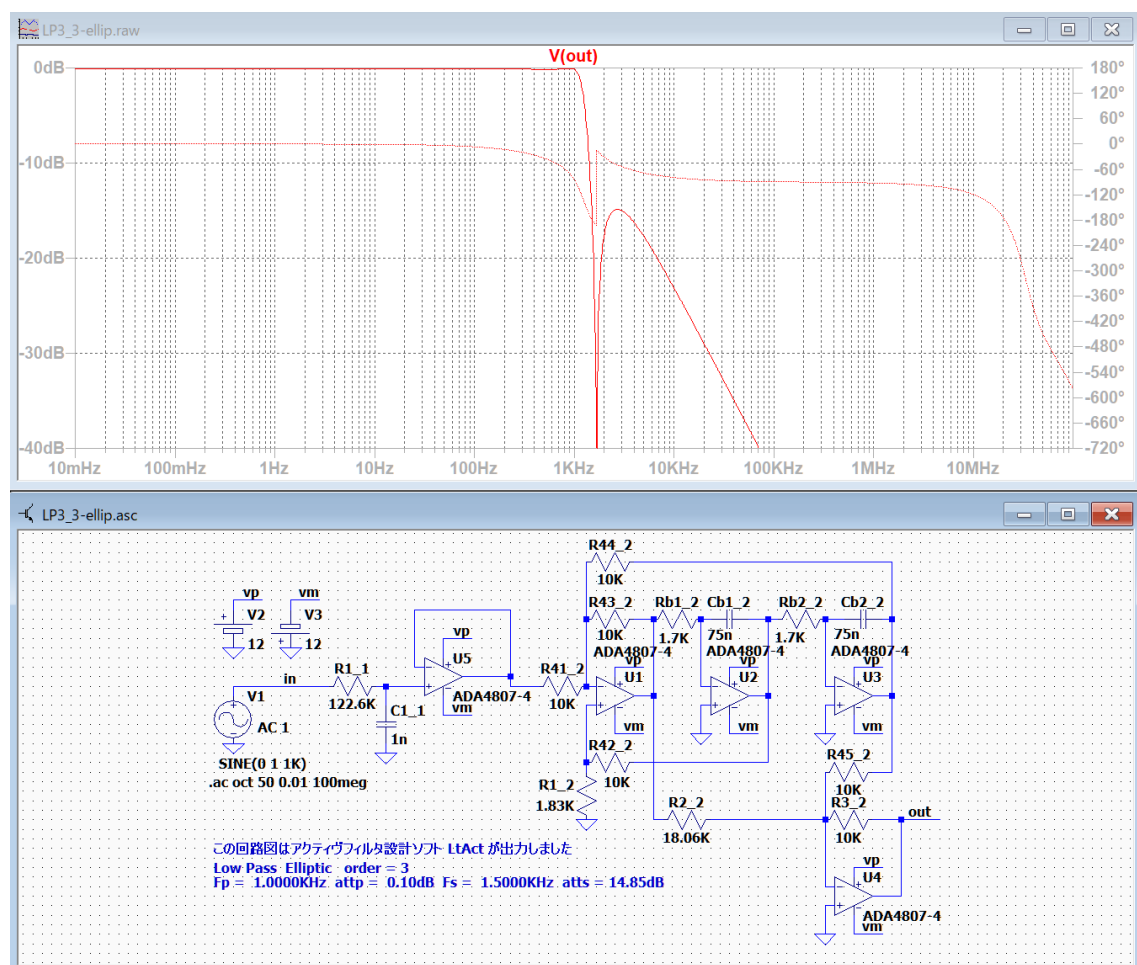
et1cr Z=Rb と R=R4 を与えて、LP3 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

cb=C;r4=R;wc=sqrt(p1);Q=wc/p0;FSF=wc;r1=R/(3\*Q-1);R3=p4\*R/p1;R2=R3/p2; rb=1/(C\*FSF);

c=75 n;R=10 k;p0=3.6398 K;p1=61.3446 Meg;p2=0.5538;p4=61.3446 Meg;\$et1cr

→ Rb=1.7024 K Cb=74.99809288 n R1=1833.002477 k R2=18.05706031 k

R3=10 k R4=10 k が得られます。



## et2 使用 逆チェビシェフローパスフィルター

3 次逆チェビシェフローパスフィルタ LP4\_3-inv.asc での使用例

### 伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	4.0254K	99.0630Meg	0.8364	0	99.0630Meg

### 回路図の R と C の値

2 (et2) 「LP4-0-1」 Rb\_2(2 個)= 278.4489 Cb\_2(2 個)= 0.3300 u

C1\_2=0.6600 u C2\_2=68.0000 n

R1\_2 = 139.2245 R2\_2 = 3.0743 K R3\_2 = 177.3619 R4\_2 = 11.6056 K

R5\_2 = 10.0000 K R6\_2 = 10.0000 K

et2zkr Z=Rb, kr=2\*Rb/R2 を与えて、LP4 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

wc=sqrt(p1);Q=sqrt(p1)/p0;FSF=sqrt(p1/p2);Rb=Z;R2=2\*Rb/kr;R5=10k;R6=10 k;

kd=(1+kr-p2)/p2; Cb=1/(Z\*FSF);kk=(kd+kr+4\*(sqrt(p2)\*(1+kd)/Q))/4;R3=(kk-1)\*R5;

R4= (1+kr)/kk\*R6;C1=2\*Cb;C2=kd\*Cb/2;

Z=278.4489;kr=0.181146212;p0=4.0254 K;p1=99.0630 Meg;p2=0.8364;p4=99.0630 Meg;

\$et2zkr

→ Rb=278.4489 Cb= 0.3299937903 u C1= 0.6599875806 u C2= 68.00819535 n

R1= 139.224 R2= 3.074300002 k R3= 177.4721383 R4= 11.60549689 k

R5=10k R6=10 k が得られます。

電卓の入力に計算式が含まれていても構いません。上記の入力は次のようにできます。

Z=278.4489;kr=2\*278.4489/(3.0743 K);p0=4.0254 K;p1=99.0630 Meg;

p2=0.8364;p4=99.0630 Meg;\$et2zkr

→ Rb=278.4489 Cb= 0.3299937903 u C1= 0.6599875806 u C2= 68.00819535 n

R1= 139.224 R2= 3.074300002 k R3= 177.4721383 R4= 11.60549689 k

R5=10k R6=10 k が得られます。

Rb=10k に変更したいなら、次のように入力します。

Z=10 k;kr=2\*278.4489/(3.0743 K);p0=4.0254 K;p1=99.0630 Meg;

p2=0.8364;p4=99.0630 Meg;\$et2zkr

→ Rb=10 k Cb= 9.188640791 n C1=18.37728158 n C2= 1.893680719 n

R1= 5 k R2= 110.4080497 k R3= 177.4721389 R4= 11.60549689 k

伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ローパスフィルタ LP3 と LP4 の計算マクロ

R5=10k R6=10 k が得られます。

et2ckr C=Cb, kr=2\*Rb/R2 を与えて、LP4 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

wc=sqrt(p1);Q=sqrt(p1)/p0;FSF=sqrt(p1/p2);Cb=C;R=1/(C\*FSF); Rb=R;R2=2\*Rb/kr;

R5=10 k;R6=10 k;kd=(1+kr-p2)/p2;kk=(kd+kr+4-(sqrt(p2)\*(1+kd)/Q))/4;

R3=(kk-1)\*R5;R4= (1+kr)/kk\*R6;C1=2\*Cb;C2=kd\*Cb/2;

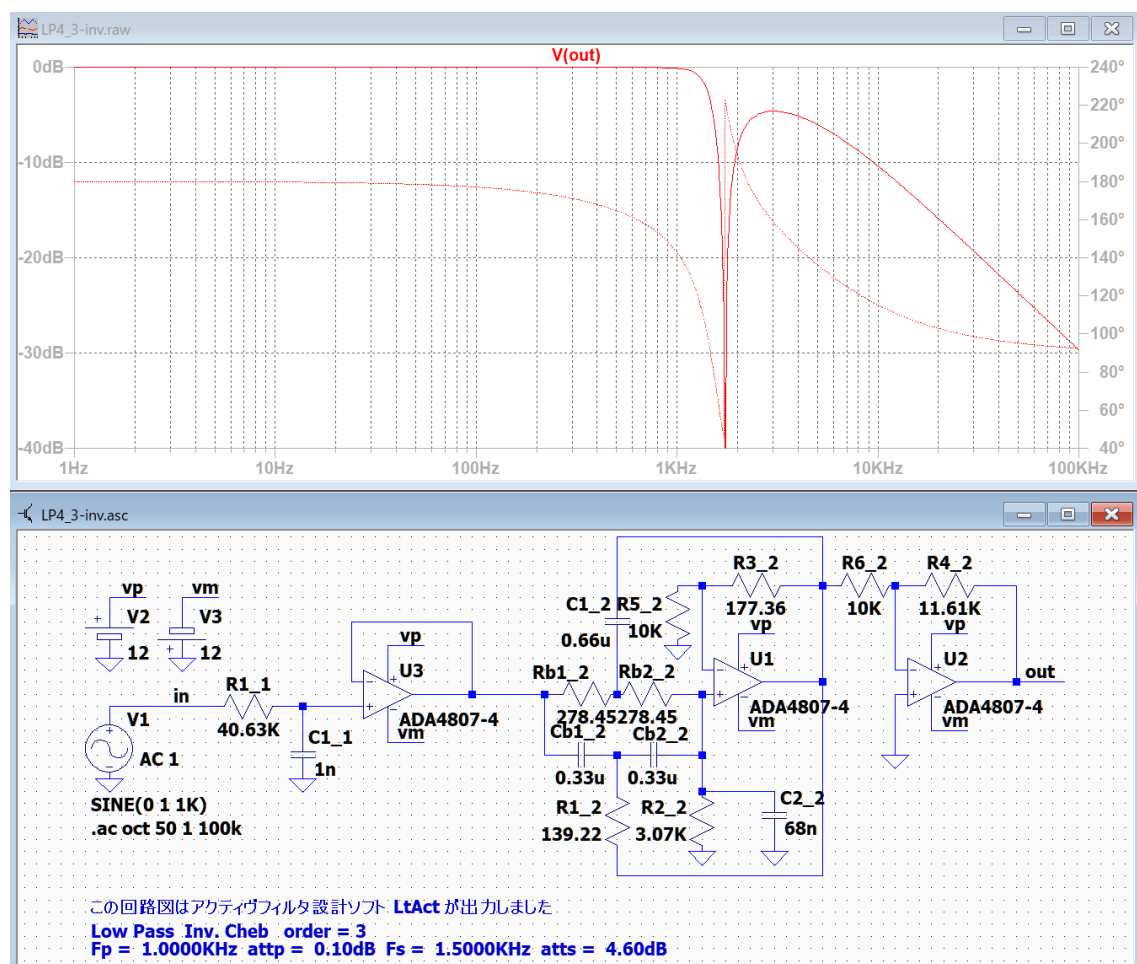
C=0.33 u;kr= 0.181146212;p0=4.0254 K;p1=99.0630 Meg;p2=0.8364;

p4=99.0630 Meg;\$et2ckr

→ Rb=278.4489 Cb= 0.3299937903 u C1= 0.6599875806 u C2= 68.00819535 n

R1= 139.222 R2= 3.074300002 k R3= 177.4721383 R4= 11.60549689 k

R5=10k R6=10 k が得られます。



## et2 使用 楕円関数ローパスフィルター

3 次楕円関数ローパスフィルタ LP4\_3-ellip.asc での使用例

## 伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	3.6398K	61.3446Meg	0.5538	0	61.3446Meg

## 回路図の R と C の値

2 (et2) 「LP4-0-1」 Rb\_2(2 個)= 287.9130 Cb\_2(2 個)=0.3300 u

C1\_2=0.6600 u C2\_2=0.1500 u

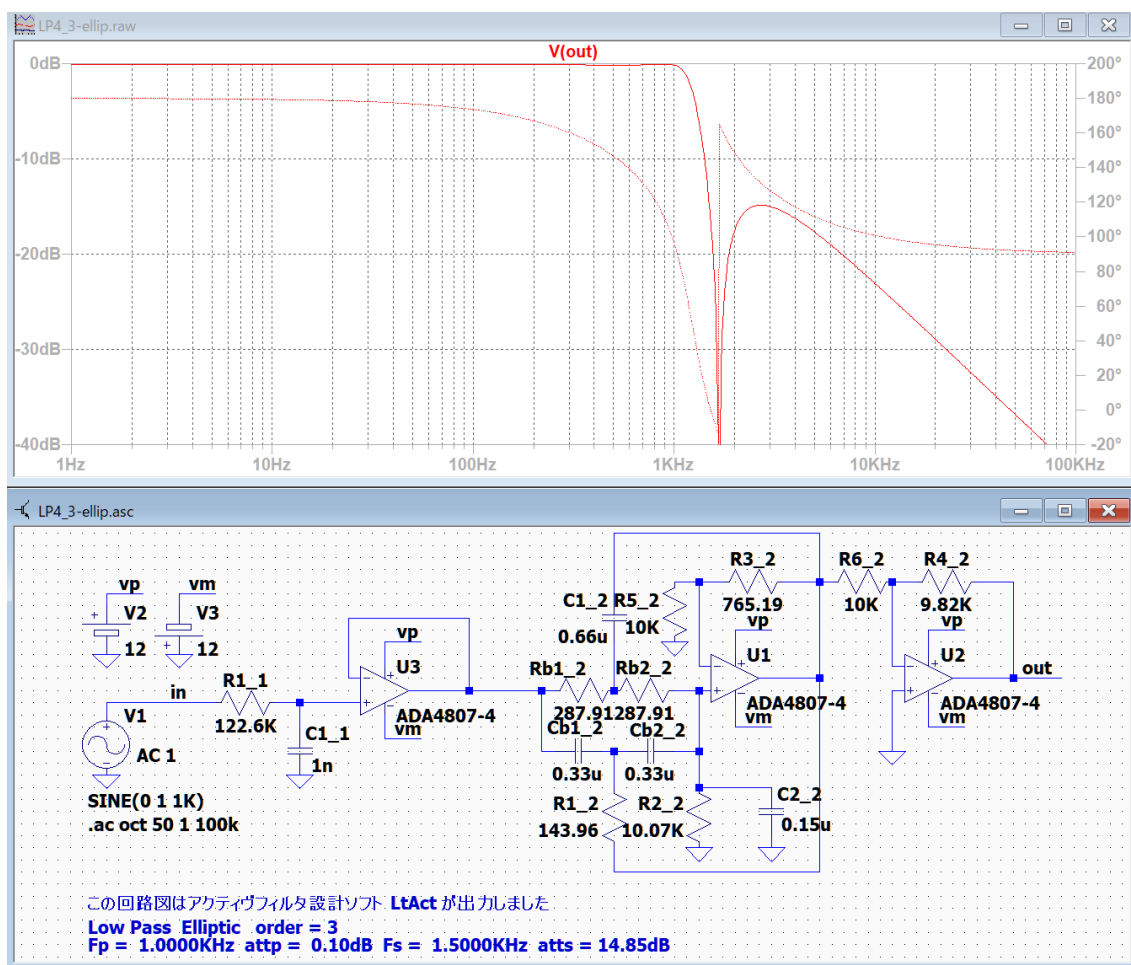
R1\_2 = 143.9565 R2\_2=10.0686 K R3\_2 = 765.1877 R4\_2=9.8205 K

R5\_2=10.0000 K R6\_2=10.0000 K

et2zkr Z=Rb,  $kr=2 \cdot Rb/R2$  を与えて、LP4 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用 $wc=\sqrt{p1}$ ;  $Q=\sqrt{p1}/p0$ ;  $FSF=\sqrt{p1/p2}$ ;  $Rb=Z$ ;  $R2=2 \cdot Rb/kr$ ;  $R5=10 \text{ k}$ ;  $R6=10 \text{ k}$ ; $kd=(1+kr \cdot p2)/p2$ ;  $Cb=1/(Z \cdot FSF)$ ;  $kk=(kd+kr+4 \cdot (\sqrt{p2} \cdot (1+kd)/Q))/4$ ; $R3=(kk-1) \cdot R5$ ;  $R4=(1+kr)/kk \cdot R6$ ;  $C1=2 \cdot Cb$ ;  $C2=kd \cdot Cb/2$ ; $Z=287.9130$ ;  $kr=0.05719$ ;  $p0=3.6398 \text{ K}$ ;  $p1=61.3446 \text{ Meg}$ ;  $p2=0.5538$ ; $p4=61.3446 \text{ Meg}$ ; \$et2zkr→  $Rb=287.913$   $Cb=0.3300099478 \text{ u}$   $C1=0.6600198956 \text{ u}$   $C2=0.1499852904 \text{ u}$  $R1=143.957$   $R2=10.06864837 \text{ k}$   $R3=764.9473736$   $R4=9.820670397 \text{ k}$  $R5=10 \text{ k}$   $R6=10 \text{ k}$  が得られます。et2ckr  $C=Cb$ ,  $kr=2 \cdot Rb/R2$  を与えて、LP4 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用 $wc=\sqrt{p1}$ ;  $Q=\sqrt{p1}/p0$ ;  $FSF=\sqrt{p1/p2}$ ;  $Cb=C$ ;  $R=1/(C \cdot FSF)$ ;  $Rb=R$ ;  $R2=2 \cdot Rb/kr$ ;  $R5=10$  $\text{k}$ ;  $R6=10 \text{ k}$ ;  $kd=(1+kr \cdot p2)/p2$ ; $kk=(kd+kr+4 \cdot (\sqrt{p2} \cdot (1+kd)/Q))/4$ ;  $R3=(kk-1) \cdot R5$ ; $R4=(1+kr)/kk \cdot R6$ ;  $C1=2 \cdot Cb$ ;  $C2=kd \cdot Cb/2$ ; $C=0.33 \text{ u}$ ;  $kr=0.05719$ ;  $p0=3.6398 \text{ K}$ ;  $p1=61.3446 \text{ Meg}$ ;  $p2=0.5538$ ;  $p4=61.3446 \text{ Meg}$ ; \$et2ckr→  $Rb=287.913$   $Cb=0.3300099478 \text{ u}$   $C1=0.6600198956 \text{ u}$   $C2=0.1499852904 \text{ u}$  $R1=143.9608395$   $R2=10.06864837 \text{ k}$   $R3=764.9473736$   $R4=9.820670397 \text{ k}$  $R5=10 \text{ k}$   $R6=10 \text{ k}$  が得られます。

伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ローパスフィルタ LP3 と LP4 の計算マクロ



伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ハイパスフィルタ HP1 と HP2 の計算マクロ

## ハイパスフィルタ HP1 と HP2 の計算マクロ

### hp1 の計算マクロ (1 次のハイパスフィルタ)

3 次バターワースハイパスフィルタ HP1\_3-but.asc での使用例

#### 伝達関数の係数

1 次式

$$P0 = 6.2832 \text{ K} \quad P1 = 1.0000$$

#### 回路図の R と C の値

1 (hp1)  $R1\_1 = R1\_2 = 159.1549 \text{ K}$   $C1\_1 = 1.0000 \text{ n}$

shpz  $Z=R1$  を与える バターワースとチェビシェフ共用の 1 次フィルタ

$$r1 = z; c1 = 1/(p0 * z); r2 = z;$$

$$Z = 159.1549 \text{ K}; p0 = 6.2832 \text{ K}; \$shpz$$

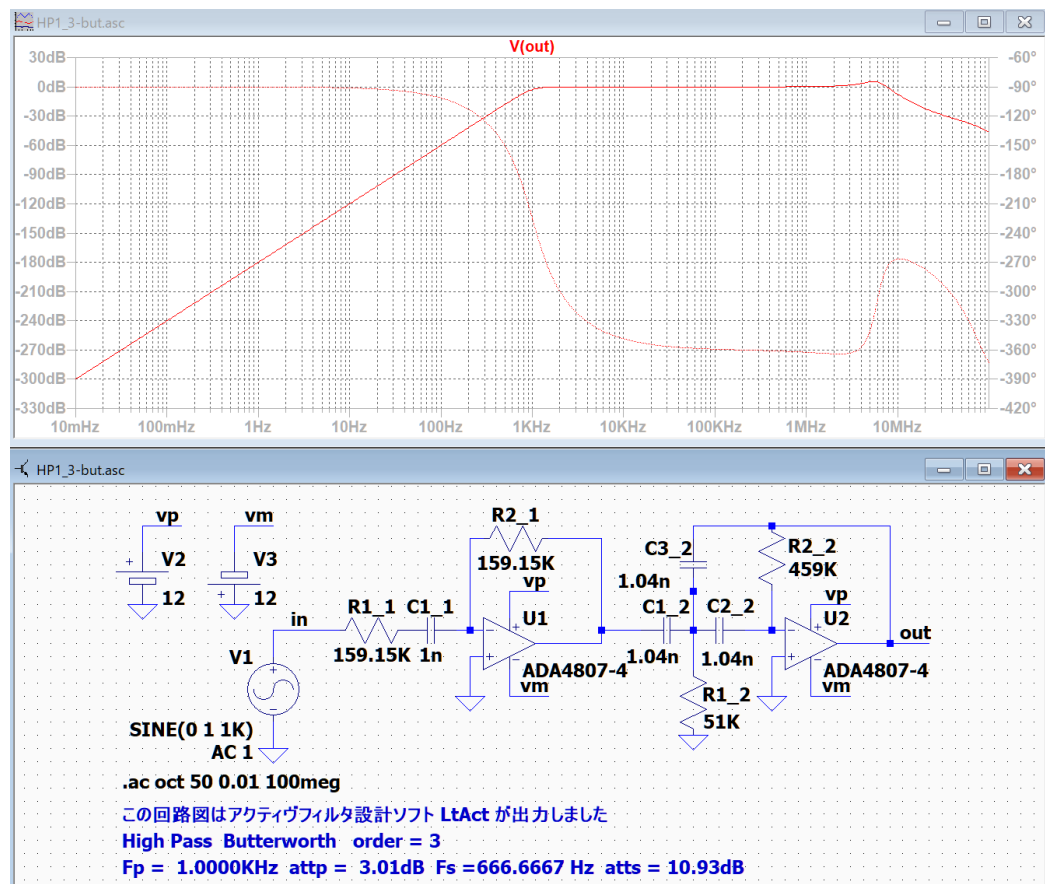
→  $R1 = R2 = 159.1549 \text{ k}$   $C1 = 0.9999979323 \text{ n}$  が得られます。

shpc  $C=C1$  を与える バターワースとチェビシェフ共用の 1 次フィルタ

$$c1 = c; r1 = 1/(p0 * c); r2 = r1$$

$$C = 0.9999979323 \text{ n}; p0 = 6.2832 \text{ K}; \$shpc$$

→  $R1 = R2 = 159.1549 \text{ k}$   $C1 = 0.9999979323 \text{ n}$  が得られます。



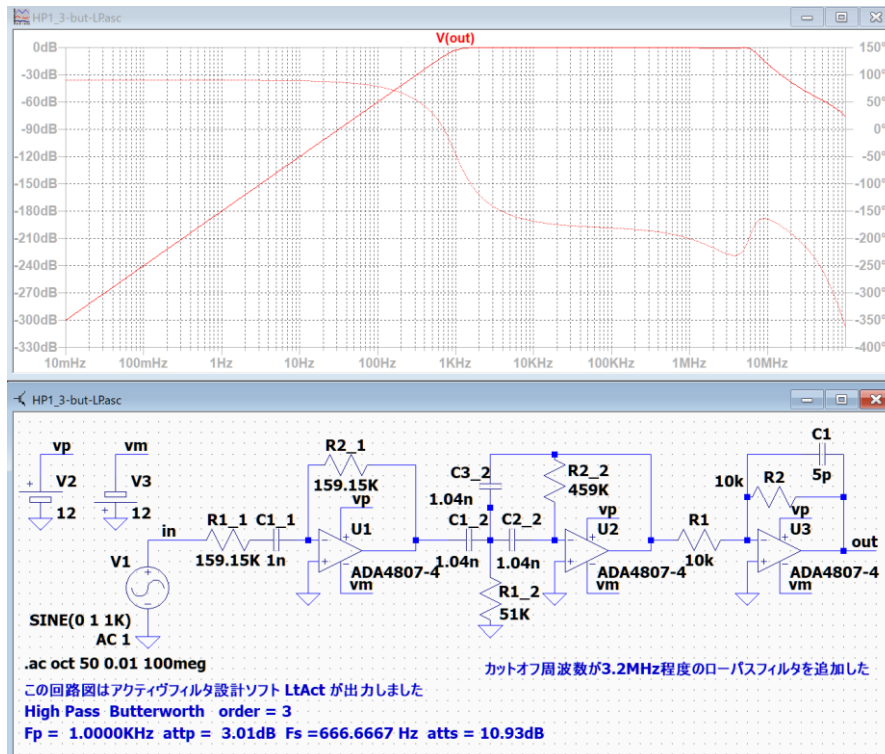


伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

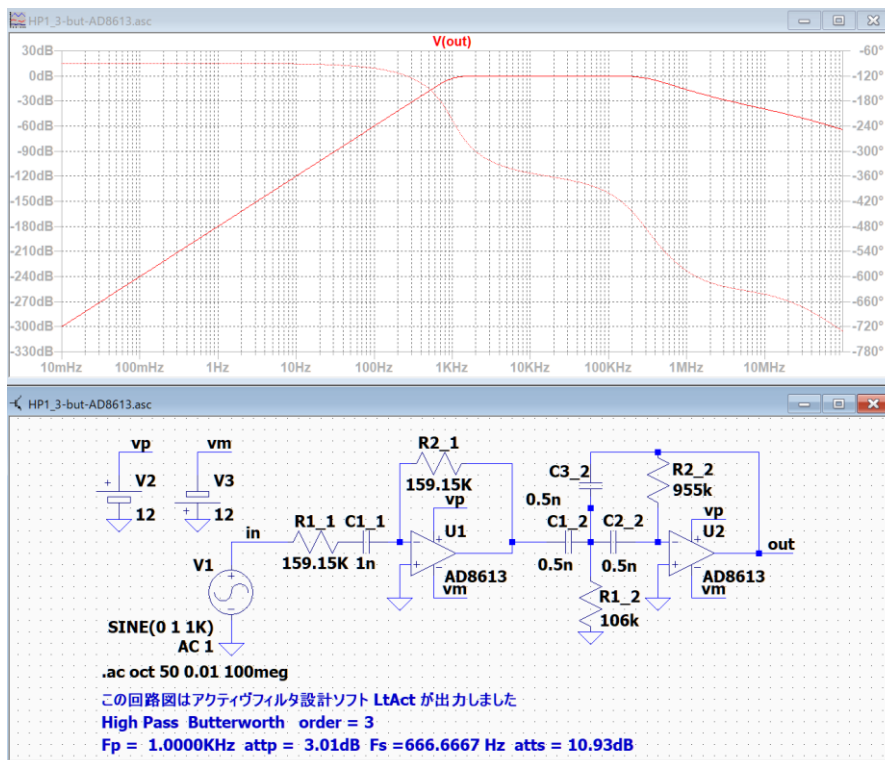
ハイパスフィルタ HP1 と HP2 の計算マクロ

5.5MHz に 5.5dB のピークがあります。

カットオフ周波数が 2.8MHz 程度のローパスフィルタを追加すれば消すことができます。



オペアンプを AD8613、C1...C3 を 0.5n に変更してもピークが消えますが通過帯域が狭くなります。



### HP1 の計算マクロ (2 次のハイパスフィルタ)

3 次バターワースハイパスフィルタ HP1\_3-but.asc での使用例

#### 伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	6.2832K	39.4784Meg	1.0000	0	0

#### 回路図の R と C の値

2 (HP1) 「HP1-0-2」 R1\_2 = 51.0000 K R2\_2 = 459.0000 K

C1\_2 = C2\_2 = C3\_2 = 1.0402 n

hp1z Z=R1 を与える m=1 とする。バターワースとチェビシェフ用

wc=sqrt(p1);Q=wc/p0;mm=1;kk=9\*Q\*Q;FSF=sqrt(mm\*kk)\*wc;r1=z;r2=kk\*z;  
c=1/(z\*FSF);c1=c;c2=c;c3=c;

z=51.0000 K;p0=6.2832 K;p1=39.4784 Meg;\$hp1z

→ R1= 51.000 k R2= 458.9976486 k C1=C2=C3= 1.040231283 n が得られます。

hp1c C=C1 を与える m=1 とする。バターワースとチェビシェフ用

wc=sqrt(p1);Q=wc/p0;mm=1;kk=9\*Q\*Q;FSF=sqrt(mm\*kk)\*wc;c=c;c1=c;c2=c;c3=c;  
z=1/(c\*FSF);r1=z;r2=kk\*z;

c=1.040231283 n;p0=6.2832 K;p1=39.4784 Meg;\$hp1c

→ R1= 51.000 k R2= 458.9976486 k C1=C2=C3= 1.040231283 n が得られます。

### HP2 の計算マクロ (2 次のハイパスフィルタ)

3 次バターワースハイパスフィルタ HP2\_3-chev.asc での使用例

#### 伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	3.6047K	23.3635Meg	1.0000	0	0

#### 回路図の R と C の値

2 (HP2) 「HP2-0-2」 R1\_2 = 75.0000 K R2\_2 = 539.4260 K

C1\_2 = C2\_2 = 1.0286 n

伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ハイパスフィルタ HP1 と HP2 の計算マクロ

**\$hp2z** Z=R1 を与える m=1 とする。バターワースとチェビシェフ用

$wc = \sqrt{p1}$ ;  $Q = wc/p0$ ;  $mm = 1$ ;  $kk = 4 * Q * Q$ ;  $FSF = \sqrt{mm * kk} * wc$ ;  $r1 = z$ ;  $r2 = kk * z$ ;

$c = 1/(z * FSF)$ ;  $c1 = c$ ;  $c2 = c$ ;

**z=75.0000 K;p0=3.6047 K;p1=23.3635 Meg;\$hp2z;**

→ R1=75 k R2= 539.4123742 k C1\_2 = C2\_2 = 1.028584473 n が得られます。

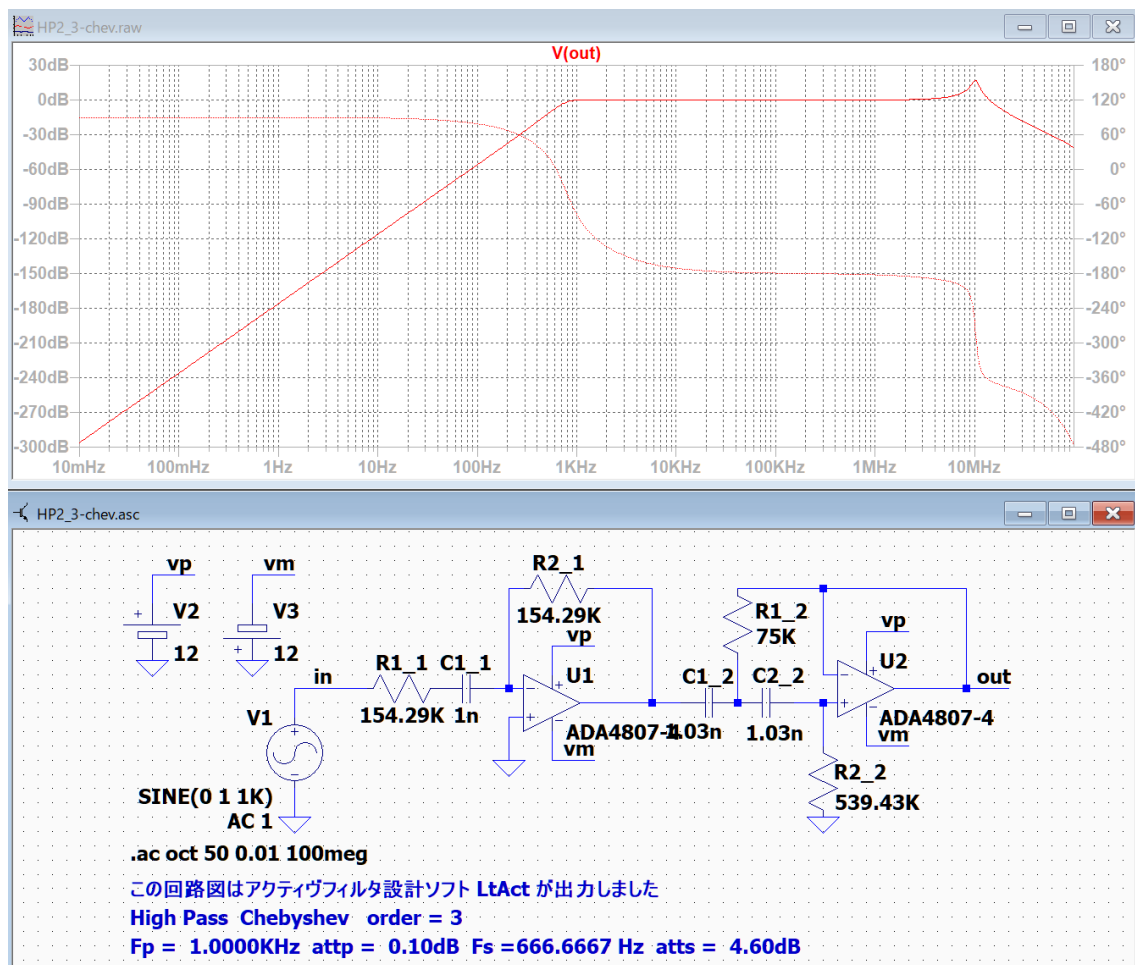
**\$hp2c** C=C1 を与える m=1 とする。バターワースとチェビシェフ用

$wc = \sqrt{p1}$ ;  $Q = wc/p0$ ;  $mm = 1$ ;  $kk = 4 * Q * Q$ ;  $FSF = \sqrt{mm * kk} * wc$ ;  $c1 = c$ ;  $c2 = c$ ;

$z = 1/(c * FSF)$ ;  $r1 = z$ ;  $r2 = kk * z$ ;

**c=1.028584473 n; p0=3.6047 K;p1=23.3635 Meg;\$hp2c;**

→ R1=75 k R2= 539.4123742 k C1\_2 = C2\_2 = 1.028584473 n が得られます。

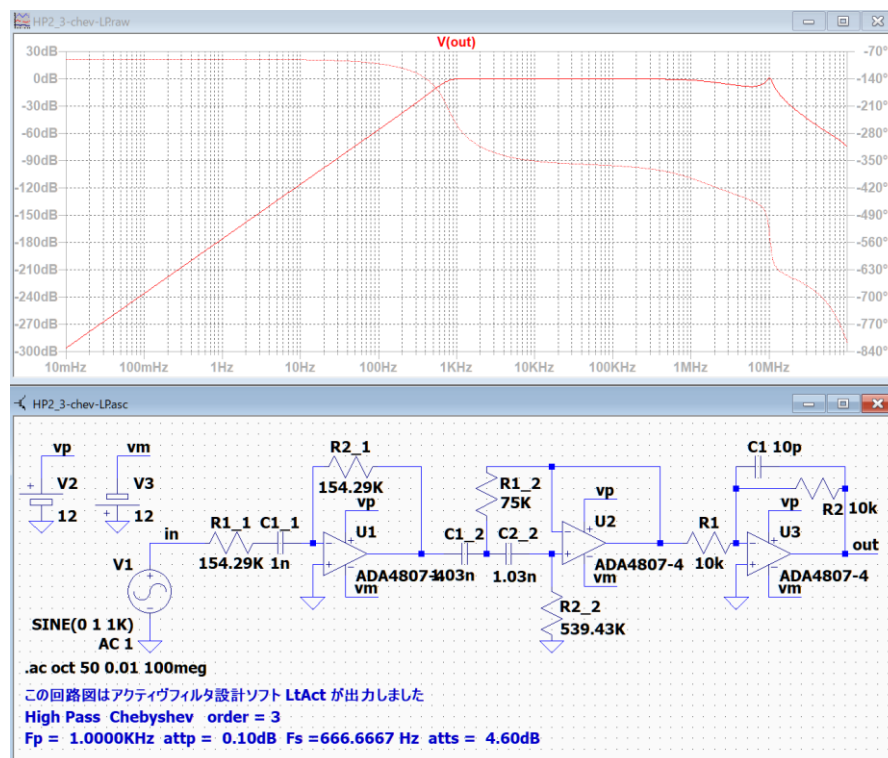


伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

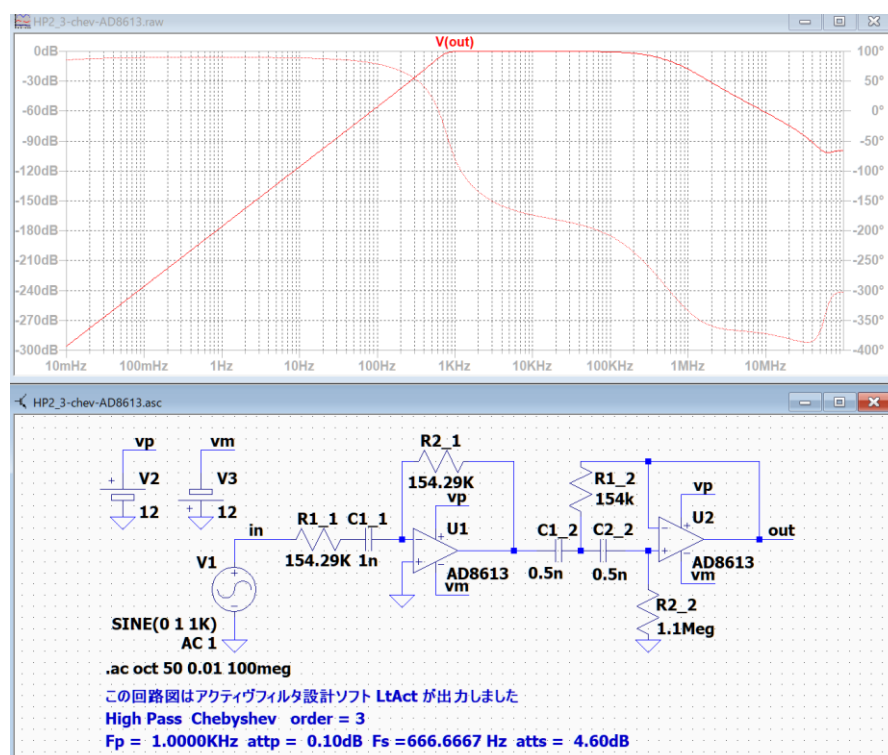
ハイパスフィルタ HP1 と HP2 の計算マクロ

10MHz に 17dB のピークがあります。

カットオフ周波数が 1.5MHz 程度のローパスフィルタを追加すれば消すことができます。



オペアンプを AD8613、C1 と C2 を 0.5n に変更してもピークが消えますが通過帯域が狭くなります。



伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ハイパスフィルタ HP3 と HP4 の計算マクロ

## ハイパスフィルタ HP3 と HP4 の計算マクロ

HP3 と HP4 は逆チェビシェフと楕円関数のハイパスフィルタです。

基本回路は HP3 は et1 を使用し、HP4 は et2 を使用します。

### et1 使用 逆チェビシェフハイパスフィルタ

3 次逆チェビシェフハイパスフィルタ HP3\_3-inv.asc での使用例

#### 伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	1.6042K	15.7329Meg	1.0000	0	13.1595Meg

#### 回路図の R と C の値

2 (et1) 「HP3-0-1」 Rb\_2(2 個)=252.1135K Cb\_2(2 個)= 1.0000n 誤差=4.80 %

2 R1\_2= 1.5582K R2\_2=8.3643 K R3\_2=8.3643 K R4\_2(5 個)=10.0000K

et1zr Z=Rb と R=R4 を与えて、逆チェビシェフ HP3 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数

rb=Z;r4=R;wc=sqrt(p1);Q=wc/p0;FSF=wc;r1=R/(3\*Q-1);R3=p4\*R/p1;R2=R3; cb=1/(Z\*FSF);

z=252.1135 k;R=10 k;p0=1.6042 K;p1=15.7329 Meg;p2=1;p4=13.1595 Meg;\$et1zr

→ Rb= 252.1135 k Cb= 0.9999988655 n R1 = 1.558199466 k

R2= 8.364319356 k R3= 8.364319356 k R4=10 k が得られます。

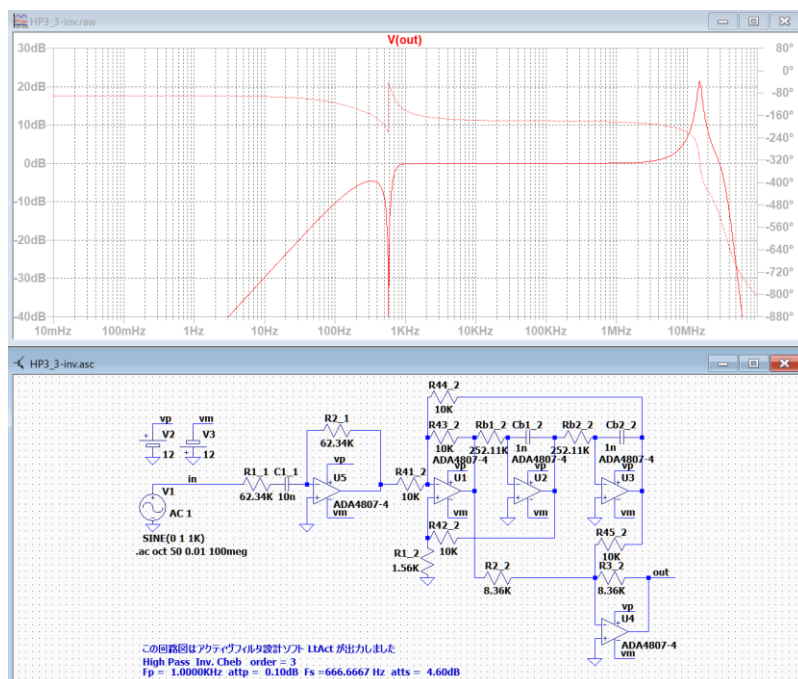
et1cr C=Cb と R=R4 を与えて、逆チェビシェフ HP3 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数

cb=C;r4=R;wc=sqrt(p1);Q=wc/p0;FSF=wc;r1=R/(3\*Q-1);R3=p4\*R/p1;R2=R3; rb=1/(C\*FSF);

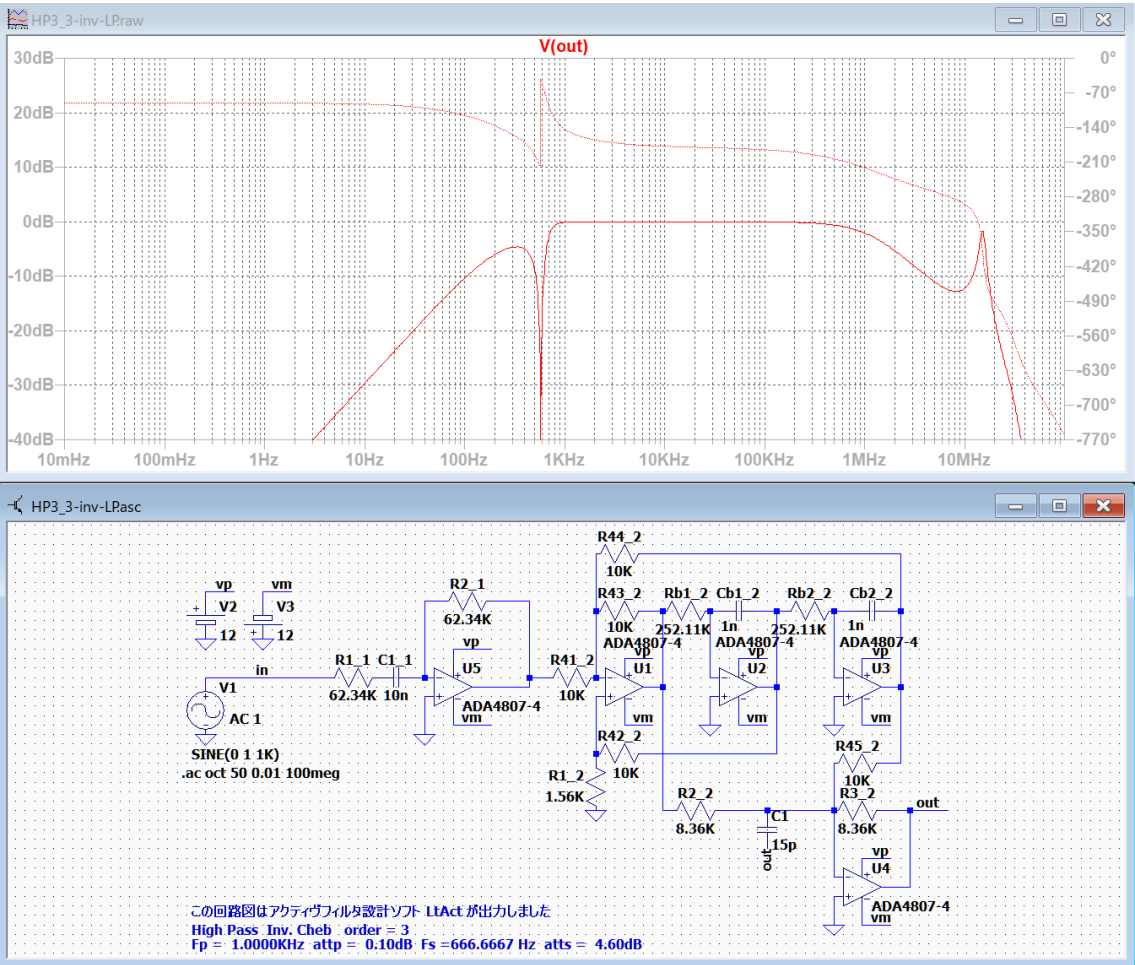
c=0.9999988655 n;R=10 k; p0=1.6042 K;p1=15.7329 Meg;p2=1;p4=13.1595 Meg;\$et1cr

→ Rb= 252.1135 k Cb= 0.9999988655 n R1 = 1.558199466 k

R2= 8.364319356 k R3= 8.364319356 k R4=10 k が得られます。



15MHz に 21dB のピークがある。R3\_2 に C1(15 p)を並列に接続するとピークを消すことが出来る。



et1 使用 楕円関数ハイパスフィルター

3 次楕円関数ハイパスフィルタ HP3\_3-ellip.asc での使用例

伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	2.3424K	25.4064Meg	1.0000	0	14.0692Meg

回路図の R と C の値

2 (et1) 「HP3-0-1」 Rb\_2(2 個)=198.3939 K Cb\_2(2 個)= 1.0000 n  
R1\_2 =1.8330 K R2\_2=5.5377 K R3\_2 =5.5377 K R4\_2(5 個)= 10.0000K

et1zr Z(Rb)と R(R4)を与えて、楕円関数 HP3 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

$wc = \sqrt{p_1}$ ;  $FSF = wc$ ;  $Rb = Z$ ;  $R4 = R$ ;  $R1 = p_0 * R / (3 * \sqrt{p_1} - p_0)$ ;

$R2 = p_4 * R / (p_1 * p_2)$ ;  $R3 = p_2 * R2$ ;  $Cb = 1 / (Z * FSF)$ ;



伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ハイパスフィルタ HP3 と HP4 の計算マクロ

$z=198.3939 \text{ K}; R=10 \text{ k}; p_0=2.3424 \text{ K}; p_1=25.4064 \text{ Meg}; p_2=1; p_4=14.0692 \text{ Meg}; \text{\$et1cr}$

→  $R_b=198.3939 \text{ k}$   $C_b=1.000000275 \text{ n}$   $R_1=1.833003189 \text{ k}$   $R_2=5.537659802 \text{ k}$   
 $R_3=5.537659802 \text{ k}$   $R_4=10 \text{ k}$  が得られます。

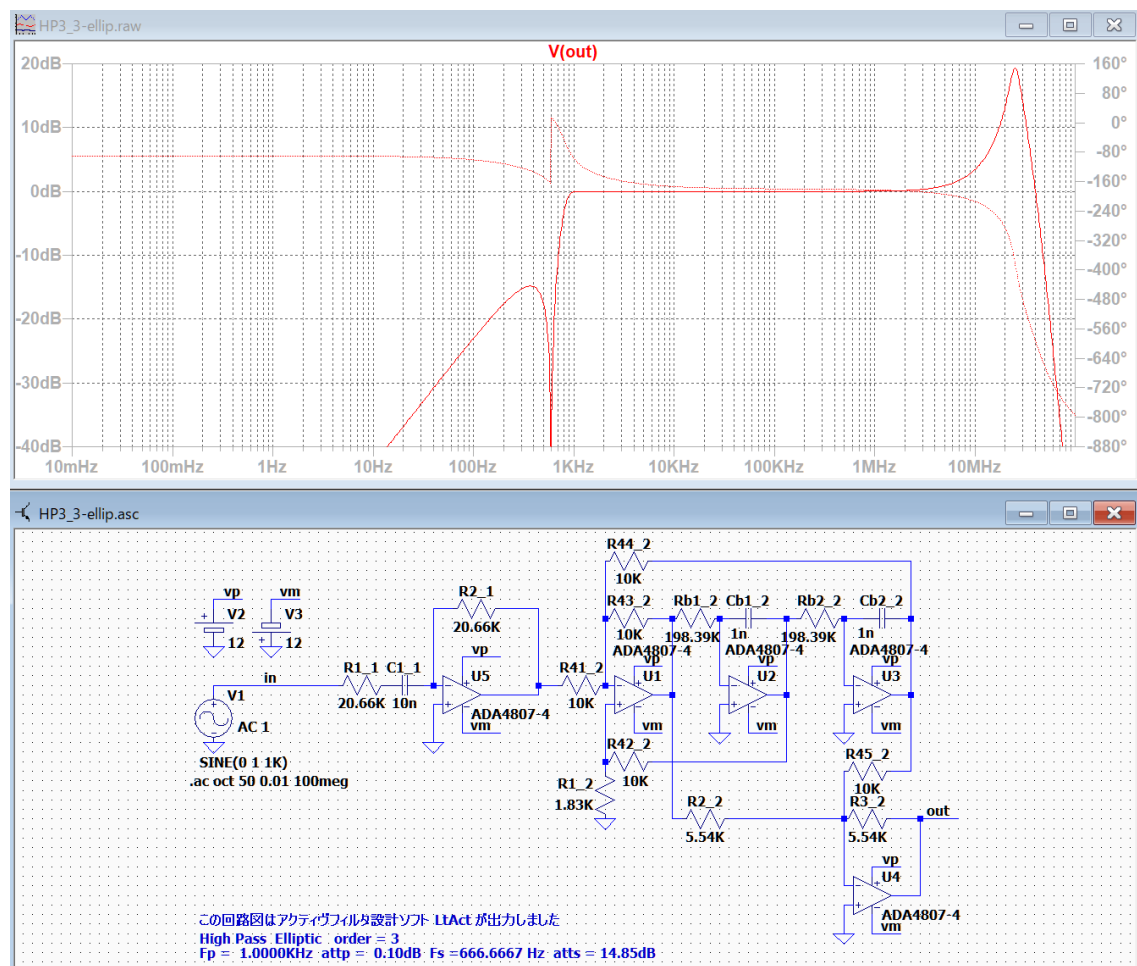
**et1cr** C(Cb)と R(R4)を与えて、楕円関数 HP3 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

$wc=\sqrt{p_1}; FSF=wc; Cb=C; R_b=1/(C*FSF); R_4=R; R_1=p_0*R/(3*\sqrt{p_1}-p_0);$

$R_2=p_4*R/(p_1*p_2); R_3=p_2*R_2;$

$c=1.000000275 \text{ n}; R=10 \text{ k}; p_0=2.3424 \text{ K}; p_1=25.4064 \text{ Meg}; p_2=1; p_4=14.0692 \text{ Meg}; \text{\$et1cr}$

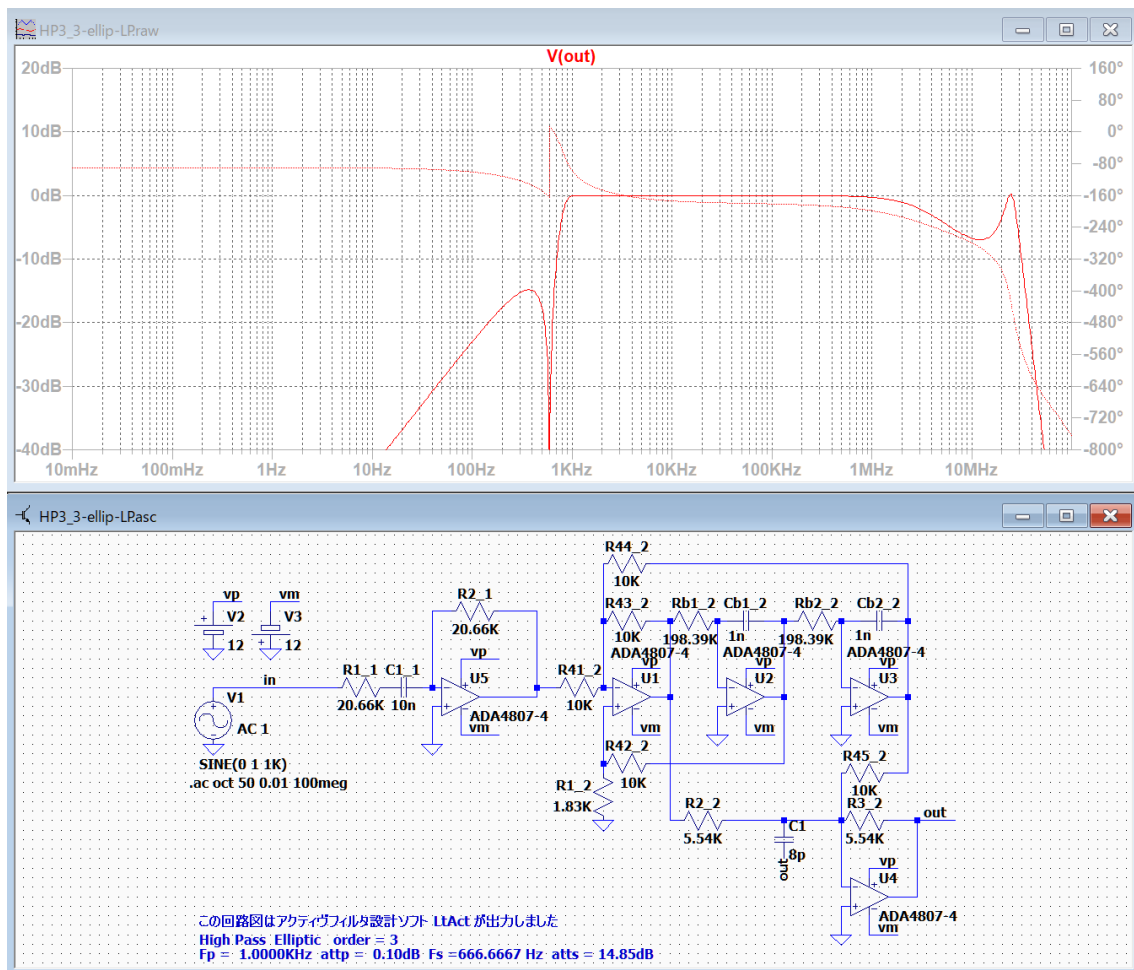
→  $R_b=198.3939 \text{ k}$   $C_b=1.000000275 \text{ n}$   $R_1=1.833003189 \text{ k}$   $R_2=5.537659802 \text{ k}$   
 $R_3=5.537659802 \text{ k}$   $R_4=10 \text{ k}$  が得られます。



伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ハイパスフィルタ HP3 と HP4 の計算マクロ

25MHz に 19dB のピークがある。R3\_2 に C1(8 p)を並列に接続するとピークを消すことが出来る。



## et2 使用 逆チェビシェフハイパスフィルタ

3 次逆チェビシェフハイパスフィルタ HP4\_3-inv.asc での使用例

### 伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	1.6042K	15.7329Meg	1.0000	0	13.1595Meg

### 回路図の R と C の値

2 (et2) 「HP4-0-1」 Rb\_2(2 個)= 275.6644 K Cb\_2(2 個)= 1.0000 n

C1\_2 = 2.0000n C2\_2 = 95.5810 p

R1\_2 = 137.8322 K R2\_2 = 1.3000 Meg R3\_2 = 221.2774

R4\_2 = 11.6537 K R5\_2 = 10.0000 K R6\_2 = 10.0000 K

et2zkr Z=Rb, kr=2\*Rb/R2 を与えて、HP4 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

ww=sqrt(p4/p2);FSF=ww;R5=10 k;R6=10 k;Rb=z;Cb=1/(z\*FSF);R2=2\*Rb/kr;

kd=p4\*(1+kr)/(p1\*p2)-1;kk=(kd+kr+4)/4-(p0\*(1+kd))/(4\*ww);



伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ハイパスフィルタ HP3 と HP4 の計算マクロ

$R3=(kk-1)*R5; R1=Rb/2; C1=2*Cb; C2=kd*Cb/2; R4=(1+kd)*p2*R6/kk;$

$z=275.6644\text{ K}; kr=(2*275.6644\text{ K})/(1.3000\text{ Meg}); p0=1.6042\text{ K};$

$p1=15.7329\text{ Meg}; p2=1; P4=13.1595\text{ Meg}; \text{\$et2zkr};$

→  $Rb=275.6644\text{ k}$   $Cb=0.9999991295\text{ n}$   $C1=1.999998259\text{ n}$   $C2=95.58089052\text{ p}$

$R1=137.8322\text{ k}$   $R2=1.3\text{ meg}$   $R3=221.2621431$

$R4=11.65376576\text{ k}$   $R5=10\text{ k}$   $R6=10\text{ k}$  が得られます。

**et2ckr**  $C=Cb, kr=2*Rb/R2$  を与えて、HP4 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

$wv=\sqrt{p4/p2}; FSF=wv; R5=10\text{ k}; R6=10\text{ k}; Cb=c; Rb=1/(c*FSF); R2=2*Rb/kr;$

$kd=p4*(1+kr)/(p1*p2)-1; kk=(kd+kr+4)/4-(p0*(1+kd))/(4*wv); R3=(kk-1)*R5;$

$R1=Rb/2; C1=2*Cb; C2=kd*Cb/2; R4=(1+kd)*p2*R6/kk;$

$c=1.0000\text{ n}; kr=(2*275.6644\text{ K})/(1.3000\text{ Meg}); p0=1.6042\text{ K}; p1=15.7329\text{ Meg}; p2=1;$

$P4=13.1595\text{ Meg}; \text{\$et2ckr};$

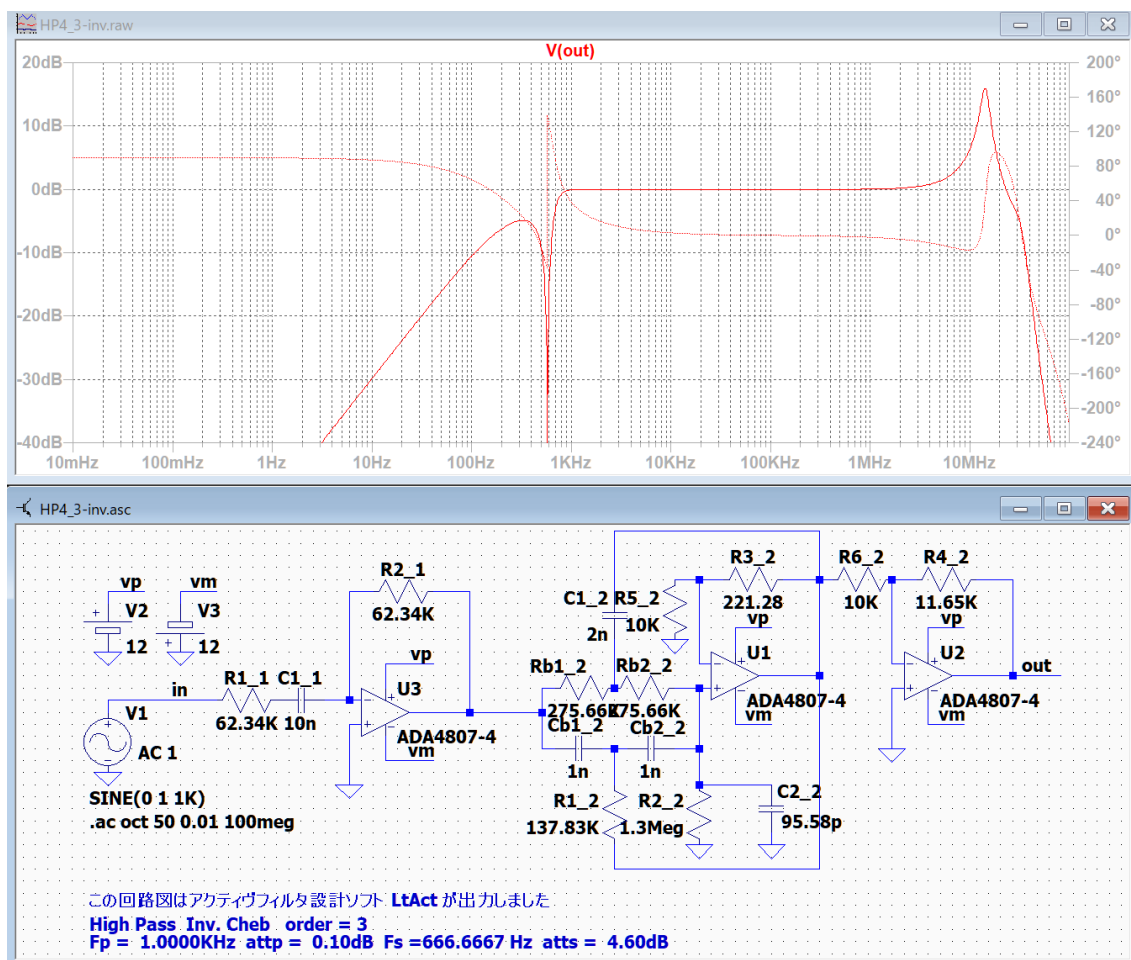
→  $Rb=275.6644\text{ k}$   $Cb=0.9999991295\text{ n}$   $C1=1.999998259\text{ n}$   $C2=95.58089052\text{ p}$

$R1=137.8322\text{ k}$   $R2=1.3\text{ meg}$   $R3=221.2621431$

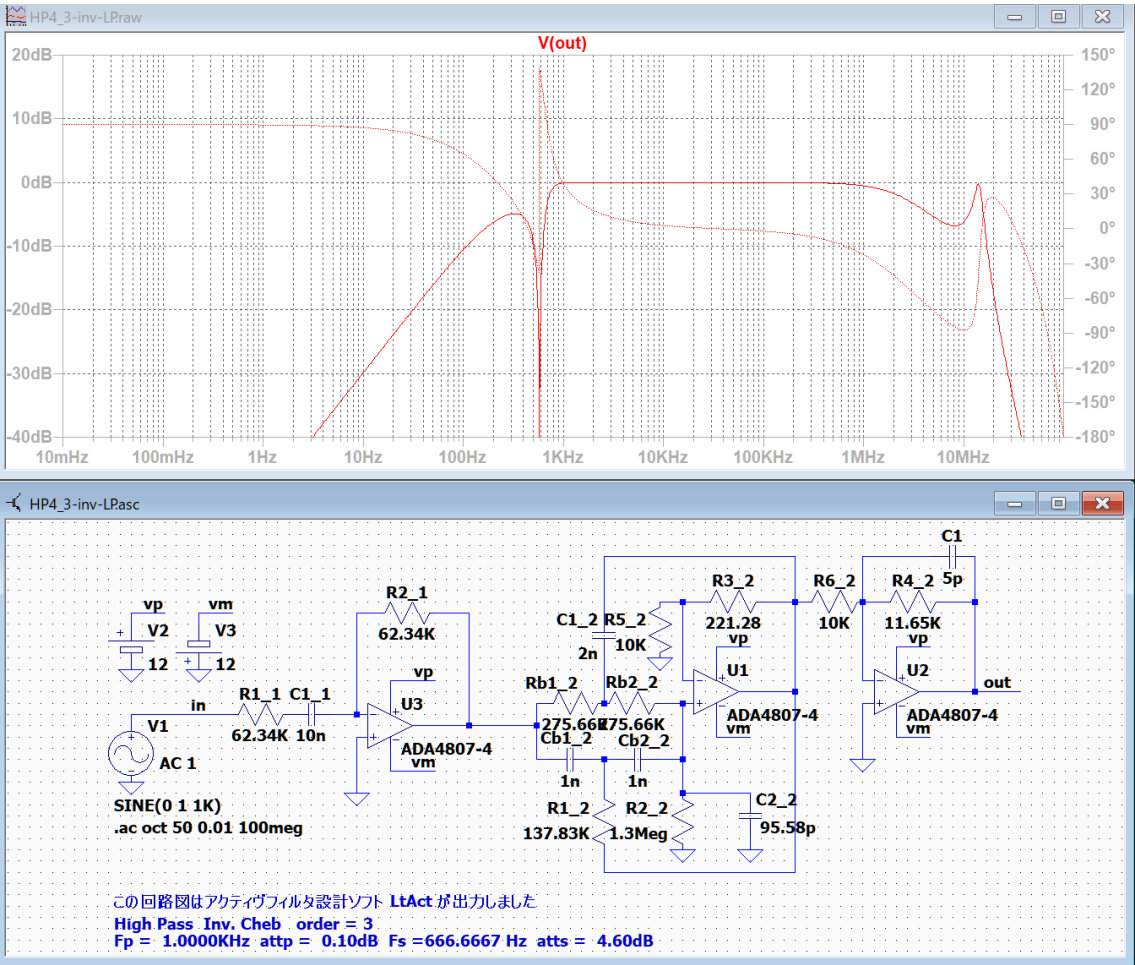
$R4=11.65376576\text{ k}$   $R5=10\text{ k}$   $R6=10\text{ k}$  が得られます。

伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ハイパスフィルタ HP3 と HP4 の計算マクロ



14MHz に 16dB のピークがある。R4\_2 に C1(5 p)を並列に接続するとピークを消すことが出来る。



et2 使用 楕円関数ハイパスフィルタ

3 次楕円関数ハイパスフィルタ HP4\_3-ellip.asc での使用例

伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	2.3424K	25.4064Meg	1.0000	0	14.0692Meg

回路図の R と C の値

2 (et2) 「HP4-0-1」 Rb\_2(2 個)= 266.6030 K Cb\_2(2 個)= 1.0000 n

C1\_2=2.0000 n C2\_2=40.5185 p

R1\_2= 133.3015 K R2\_2= 560.0000 K R3\_2= 895.2311

R4\_2=9.9221 K R5\_2=10.0000 K R6\_2=10.0000 K

et2zkr Z=Rb, kr=2\*Rb/R2 を与えて、HP4 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

wv=sqrt(p4/p2);FSF=wv;R5=10 k;R6=10 k;Rb=z;(z\*FSF);R2=2\*Rb/kr;

kd=p4\*(1+kr)/(p1\*p2)-1;kk=(kd+kr+4)/4-(p0\*(1+kd))/(4\*wv);R3=(kk-1)\*R5;

R1=Rb/2;C1=2\*Cb;C2=kd\*Cb/2;R4=(1+kd)\*p2\*R6/kk;

伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ハイパスフィルタ HP3 と HP4 の計算マクロ

```
z=266.6030 K;kr=(2*266.6030 K)/(560.0000 K);p0=2.3424 K;p1=25.4064 Meg;
```

```
p2=1;p4=14.0692 Meg;$et2zkr
```

→ Rb= 266.603 k Cb= 1.000000613 n C1= 2.000001226 n C2= 40.51814285 p

R1= 133.3015 k R2= 560 k R3= 895.2303428

R4= 9.92210538 k R5=10 k R6=10 k が得られます。

et2ckr C=Cb, kr=2\*Rb/R2 を与えて、HP4 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

```
wv=sqrt(p4/p2);FSF=wv;R5=10 k;R6=10 k;Cb=c;Rb=1/(c*FSF);
```

```
R2=2*Rb/kr;kd=p4*(1+kr)/(p1*p2)-1;kk=(kd+kr+4)/4-(p0*(1+kd))/(4*wv);
```

```
R3=(kk-1)*R5;R1=Rb/2;C1=2*Cb;C2=kd*Cb/2;R4=(1+kd)*p2*R6/kk;
```

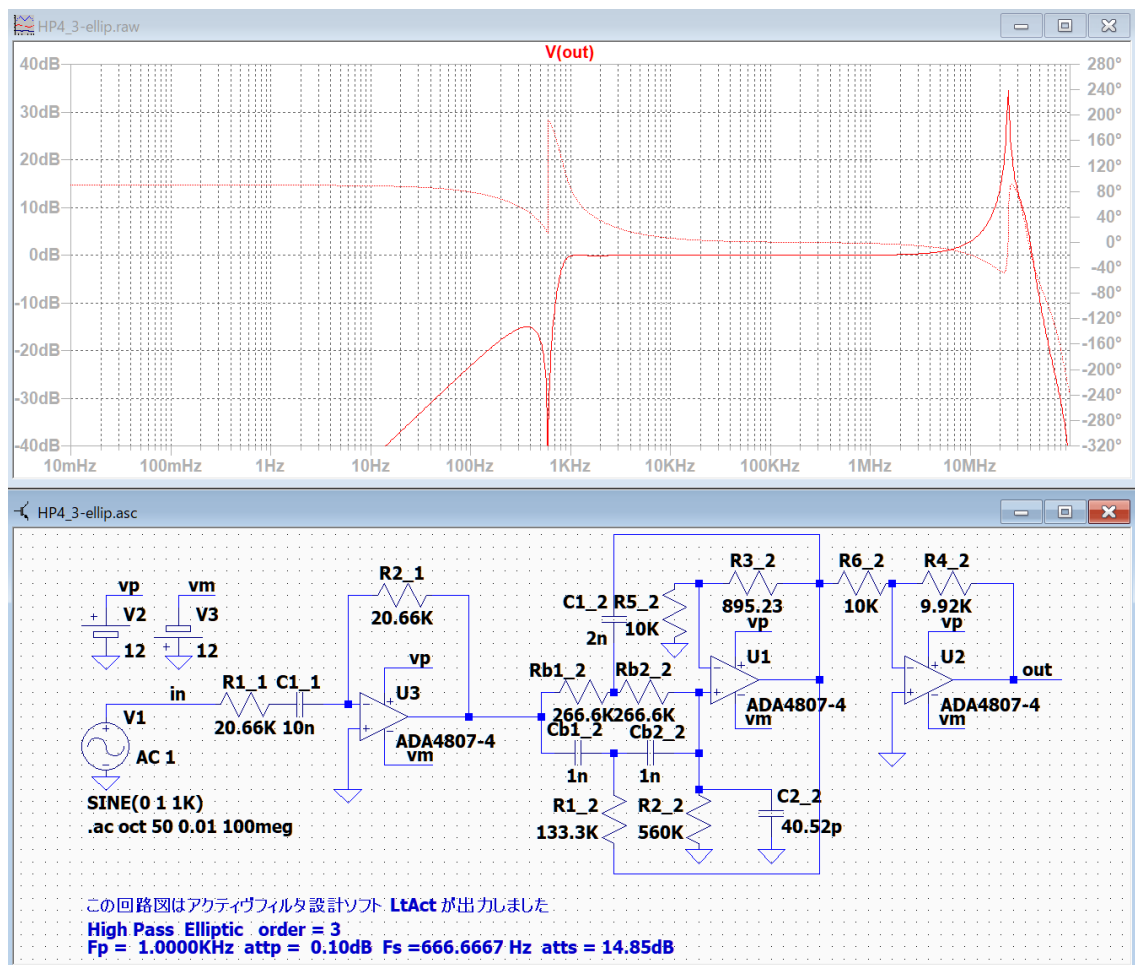
```
c=1 n;kr=(2*266.6030 K)/(560.0000 K);p0=2.3424 K;p1=25.4064 Meg;p2=1;
```

```
p4=14.0692 Meg;$et2ckr
```

→ Rb= 266.603 k Cb= 1.000000613 n C1= 2.000001226 n C2= 40.51814285 p

R1= 133.3015 k R2= 560 k R3= 895.2303428

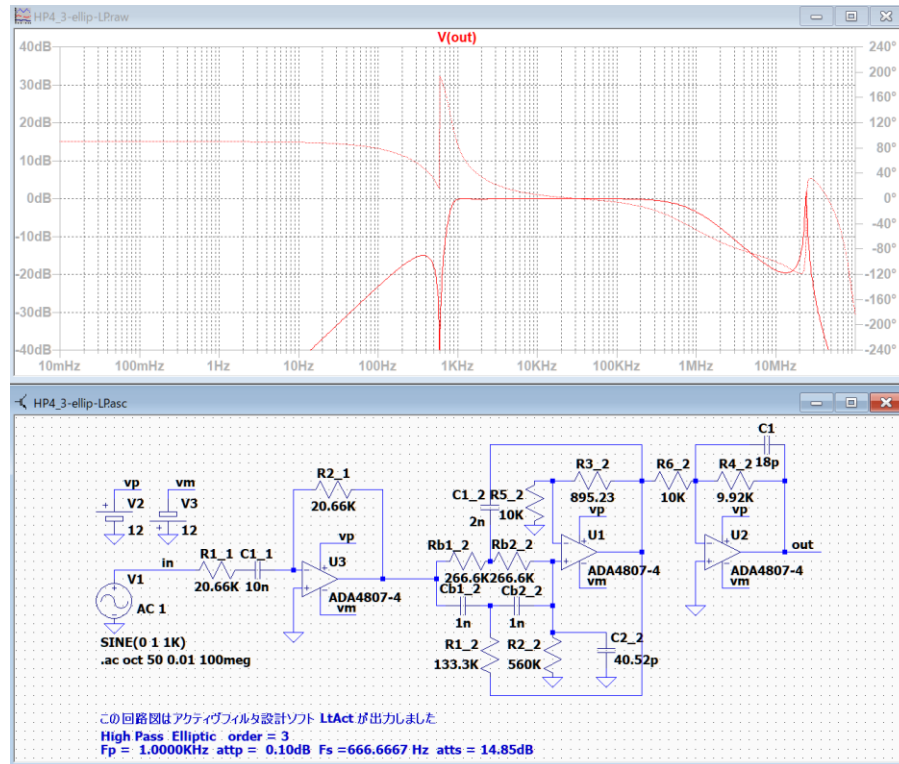
R4= 9.92210538 k R5=10 k R6=10 k が得られます。



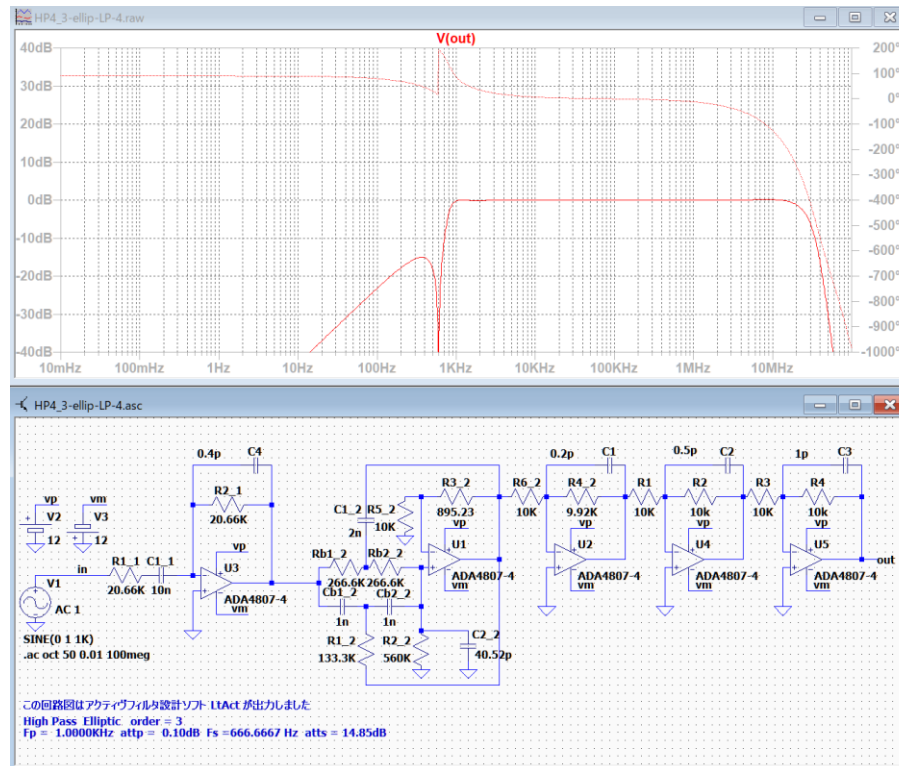
伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

ハイパスフィルタ HP3 と HP4 の計算マクロ

24MHz に 34dB のピークがある。R4\_2 に C1(18 p)を並列に接続するとピークを消すことが出来る。



カットオフ周波数が高いローパスフィルタを複数使用すると通過帯域を広げられる。

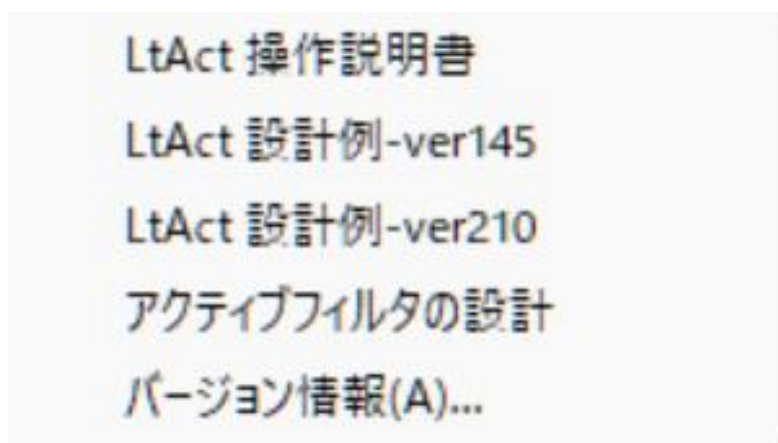


伝達関数の係数を  $R, C$  の素子値に変換するマクロのまとめ

ハイパスフィルタ HP3 と HP4 の計算マクロ

各種フィルターを設計・合成すると、通過域や阻止域に不要なピークが発生したり、期待した周波数特性が得られないことがあります。しかし、調整により不具合をある程度改善できます。

現在公開中の「LtAct」を実行して、「ヘルプ」を押して「LtAct 操作説明書.pdf」または「LtAct 設計例-ver210.pdf」をクリックして改善方法を参照して下さい。



「LtAct 操作説明書.pdf」の「LtAct の操作」→「6 表示・出力」の「ver.3.00 以降の実験 1」～「BE2 ellip ピークの低い回路図」及び「LtAct 設計例-ver210.pdf」には多数のフィルタの設計例およびその調整例が含まれています。設計したフィルタの周波数特性を改善するヒントが得られると思います。

バンドパスフィルタ BP1 と BP2 の計算マクロ

バターワース、チェビシェフ バンドパスフィルター

基本回路 BP1 または BP2 を次数の個数使用します。

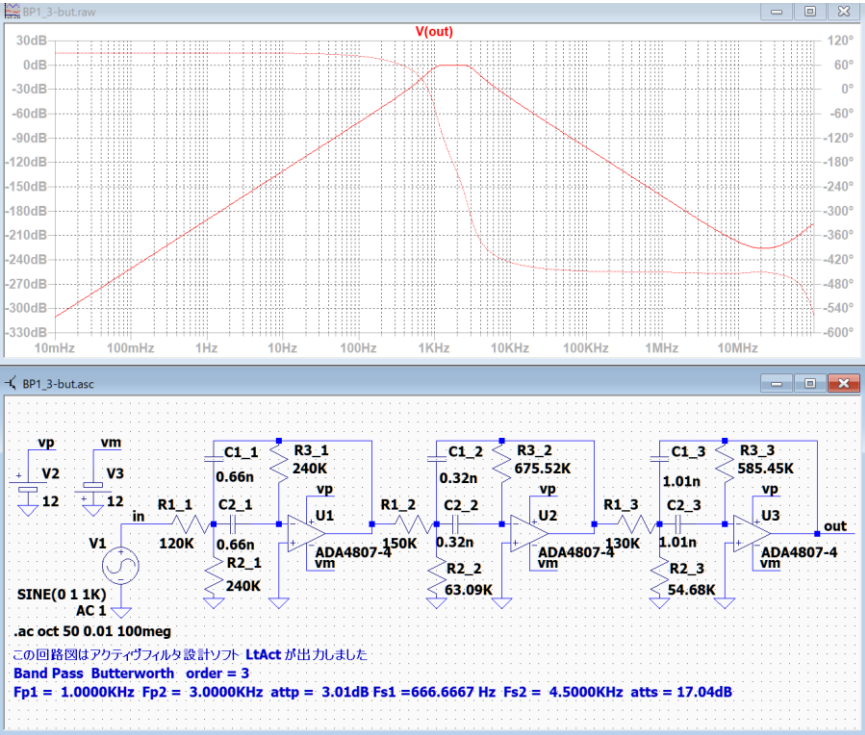
3 次バターワースバンドパスフィルタ BP1\_3-but.asc での使用例

伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	12.5664K	118.4353Meg	0	12.5664K	0

回路図の R と C の値

1(BP1)「BP1-0-2」 C1\_1 = C1\_2 =0.6631 n  
R1\_1 = 120.0000 K R2\_1 = 240.0000 K R3\_1 = 240.0000 K  
bp1z Z=R1 を与えて、BP1 を計算する バターワースとチェビシェフ用  
 $y=p3/p0; wc=\sqrt{p1}; q=wc/p0; r1=z; r3=2*y*r1; c=q/(y*wc*z); r2=y*z/(2*q*q-y)$   
z=120 k;p0=12.5664 K;p1=118.4353 Meg;p3=12.5664 K;\$bp1z  
→ R1=120 k R2= 240.0030805 k R3= 240.000 k C1\_1 = C1\_2 =0. 6631440455 n  
が得られます。  
bp1c C=C1 を与えて、BP1 を計算する バターワースとチェビシェフ用  
 $C1=c; C2=c; y=p3/p0; wc=\sqrt{p1}; q=wc/p0; z=q/(y*wc*c); r1=z; r3=2*y*r1; r2=y*z/(2*q*q-y)$   
c=0.6631440455 n;p0=12.5664 K;p1=118.4353 Meg;p3=12.5664 K;\$bp1c  
→ R1=120 k R2= 240.0030805 k R3= 240.000 k C1\_1 = C1\_2 =0. 6631440455 n  
が得られます。





伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

バンドパスフィルタ BP1 と BP2 の計算マクロ

3 次チェビシェフバンドパスフィルタ BP1\_3-chev.asc での使用例

#### 伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	12.1819K	118.4353Meg	0	12.1819K	0

#### 回路図の R と C の値

1(BP2) 「BP2-0-2」 R1\_1 (2 個) =27.0000 K C1\_1(2 個)= 6.0807 n

R2\_1(2 個)= 15.1115 K R3\_1 =10.0000m R4\_1 =10.0000K

bp2z Z=R1 を与えて、BP2 を計算する バターワースとチェビシェフ用

$y=p3/p0$ ;  $wc=\sqrt{p1}$ ;  $q=wc/p0$ ;  $r1=z$ ;  $r4=10$  k;  $r3=(y-1)*r4$ ;  $c=2/(z*p0)$ ;  $r2=z/(2*q)$

$z=27$  k;  $p0=12.1819$  K;  $p1=118.4353$  Meg;  $p3=12.1819$  K; \$bp2z

→ R1=27 k R2= 15.1115223 k R3=0(0.01 にする) R4=10 k C1=C2= 6.080666733 n  
が得られます。

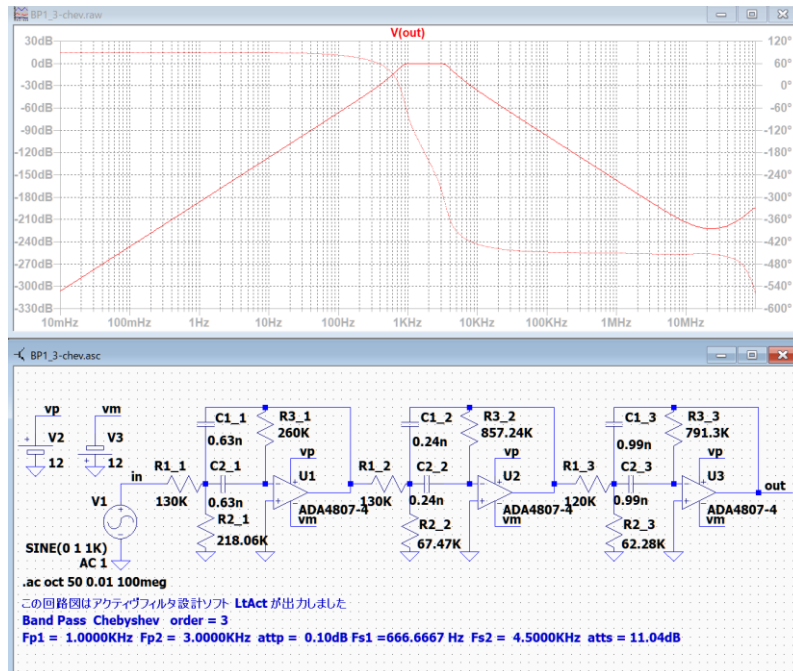
bp2c C=C1 を与えて、BP2 を計算する バターワースとチェビシェフ用

$C1=c$ ;  $C2=c$ ;  $y=p3/p0$ ;  $wc=\sqrt{p1}$ ;  $q=wc/p0$ ;  $z=2*q/(wc*c)$ ;  $r1=z$ ;  $r4=10$  k;

$r3=(y-1)*r4$ ;  $r2=z/(2*q)$

$C=6.080666733$  n;  $p0=12.1819$  K;  $p1=118.4353$  Meg;  $p3=12.1819$  K; \$bp2c

→ R1=27 k R2= 15.1115223 k R3=0(0.01 にする) R4=10 k C1=C2= 6.080666733 n  
が得られます。



フリーで利用可能な Spice シミュレーション・ソフトウェア「LTSpice」では、回路図中の素子値として「0」を指定することが出来ません。

「LtAct」で基本回路 BP2 で素子値を計算した時に R3=0 となる場合は、R3=10 m(0.01)に設定しています。

バターワース、チェビシェフ バンドパスフィルタ



## バンドパスフィルタ BP3 と BP4 の計算マクロ

## 逆チェビシェフ、楕円関数 バンドパスフィルター

奇数次数の場合は、最初の 1 次フィルターは BP2 を使用し、残りは et1 または et2 を使用する。偶数次数の場合は、全て et1 または et2 を使用する。

## et1 を使用する場合 (BP3)

3 次逆チェビシェフバンドパスフィルタ BP3\_3-et1-inv.asc での使用例

## 伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
2	11.5153K	662.9185Meg	0.6365	0	634.0993Meg

## 回路図の R と C の値

2 (et1) 「LP3-0-1」 Rb\_2(2 個)= 2.9876 K Cb\_2(2 個)= 13.0000n

2 R1\_2=1.7520 K R2\_2=15.0286 K R3\_2=9.5653 K R4\_2(5 個)= 10.0000K

et1zr Z=Rb と R4=R を与える 逆チェビシェフと楕円関数用

rb=Z;r4=R;wc=sqrt(p1); Q=wc/p0;FSF=wc; r1=R/(3\*Q-1);R3=p4\*R/p1;

R2=R3/p2; cb=1/(Z\*FSF);

z=2.9876 K;R=10 k;p0=11.5153 K;p1=662.9185 Meg;p2=0.6365;p4=634.0993 Meg;\$et1zr

→ Rb= 2.9876 k Cb= 13.00012355 n R1= 1.75200765 k

R2= 15.02791489 k R3= 9.565267827 k R4=10 k が得られます。

et1cr C=Cb と R4=R を与える 逆チェビシェフと楕円関数用

cb=C;r4=R;wc=sqrt(p1); Q=wc/p0;FSF=wc; r1=R/(3\*Q-1);R3=p4\*R/p1;

R2=R3/p2; rb=1/(C\*FSF);

c=13.00012355 n;R=10 k; p0=11.5153 K;p1=662.9185 Meg;p2=0.6365;

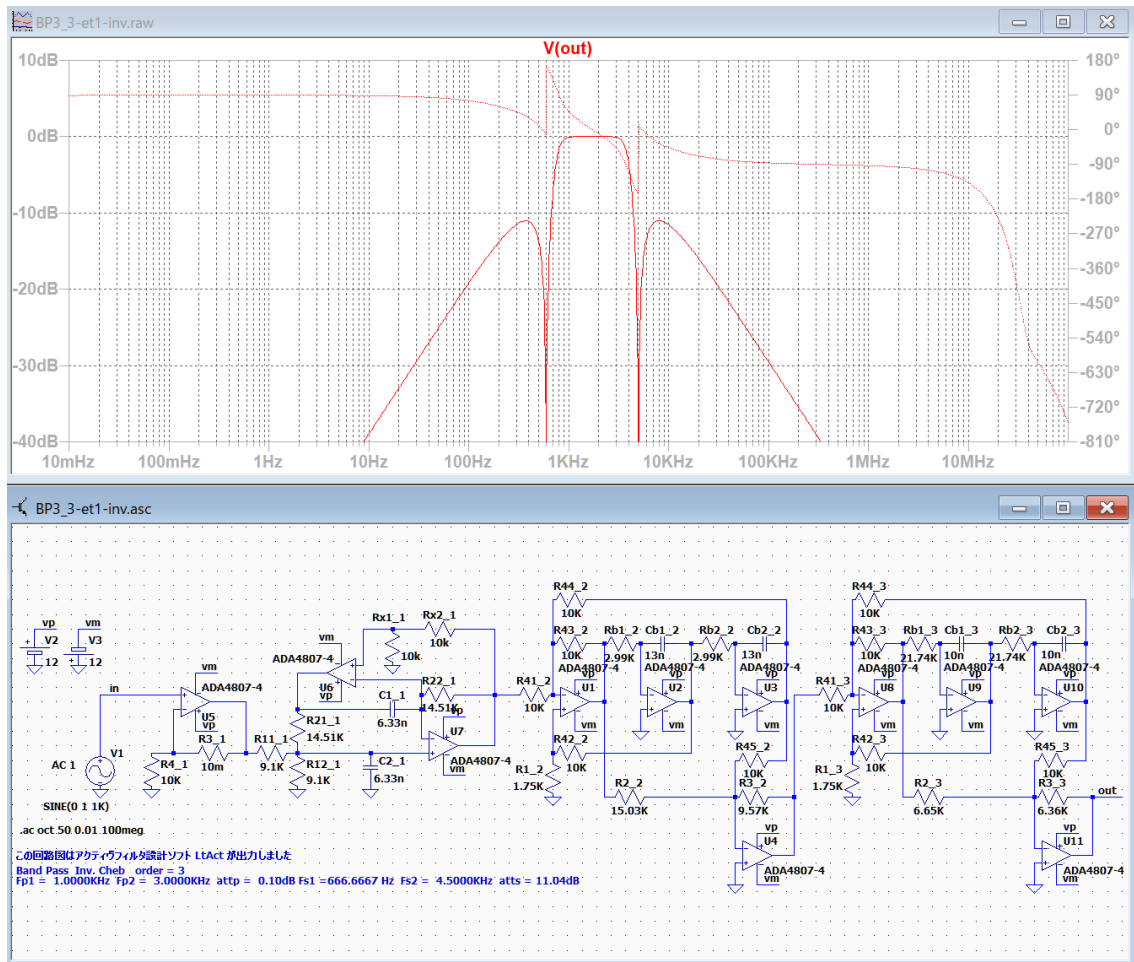
p4=634.0993 Meg;\$et1cr

→ Rb= 2.9876 k Cb= 13.00012355 n R1= 1.75200765 k

R2= 15.02791489 k R3= 9.565267827 k R4=10 k が得られます。

伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

バンドパスフィルタ BP3 と BP4 の計算マクロ



et2 を使用する場合 (BP4)

3 次楕円関数バンドパスフィルタ BP4\_3-et2-ellip.asc での使用例

伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
2	7.3895K	447.1818Meg	0.3987	0	385.6657Meg

回路図の R と C の値

2 (et2) 「LP4-0-1」 Rb\_2(2 個)= 63.0485 Cb\_2(2 個)= 0.5100u

C1\_2=1.0200u C2\_2=0.3300u

R1\_2=31.5242 R2\_2=2.0777 K R3\_2=2.0243 K

R4\_2=7.6078 K R5\_2=10.0000K R6\_2=10.0000K

et2zkr Z=Rb と kr=2Rb/R2 を与えて BP4 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

we=sqrt(p1); Q=sqrt(p1)/p0; FSF=sqrt(p1/p2); Rb=Z; R2=2\*Rb/kr; R5=10 k; R6=10 k;

kd=(1+kr-p2)/p2; Cb=1/(Z\*FSF); kk=(kd+kr+4\*(sqrt(p2)\*(1+kd)/Q))/4; R3=(kk-1)\*R5;

R4= (1+kr)/kk\*R6; C1=2\*Cb; C2=kd\*Cb/2;

et1 を使用する場合 (BP3)

伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

バンドパスフィルタ BP3 と BP4 の計算マクロ

```
z=63.0485;kr=2*63.0485/(2.0777 K);p0=7.3895 K;p1=447.1818 Meg;
```

```
p2=0.3987;p4=385.6657 Meg;$et2zkr
```

→ Rb= 63.0485 Cb= 0.5099679131 u C1= 1.019935826 u C2= 0.3300516025 u

R1= 31.52425 R2= 2.0777 k R3= 2.024899049 k

R4=7.607364133 k R5=10 k R6=10 k が得られます。

et2ckr C=Cb と  $kr=2Rb/R2$  を与えて BP4 を計算する 逆チェビシェフと楕円関数用

$wc=\sqrt{p1}$ ;  $Q=\sqrt{p1}/p0$ ;  $FSF=\sqrt{p1/p2}$ ;  $Cb=C$ ;  $R=1/(C*FSF)$ ;  $Rb=R$ ;  $R2=2*Rb/kr$ ;

$R5=10\text{ k}$ ;  $R6=10\text{ k}$ ;  $kd=(1+kr-p2)/p2$ ;  $kk=(kd+kr+4-(\sqrt{p2}*(1+kd)/Q))/4$ ;

$R3=(kk-1)*R5$ ;  $R4=(1+kr)/kk*R6$ ;  $C1=2*Cb$ ;  $C2=kd*Cb/2$ ;

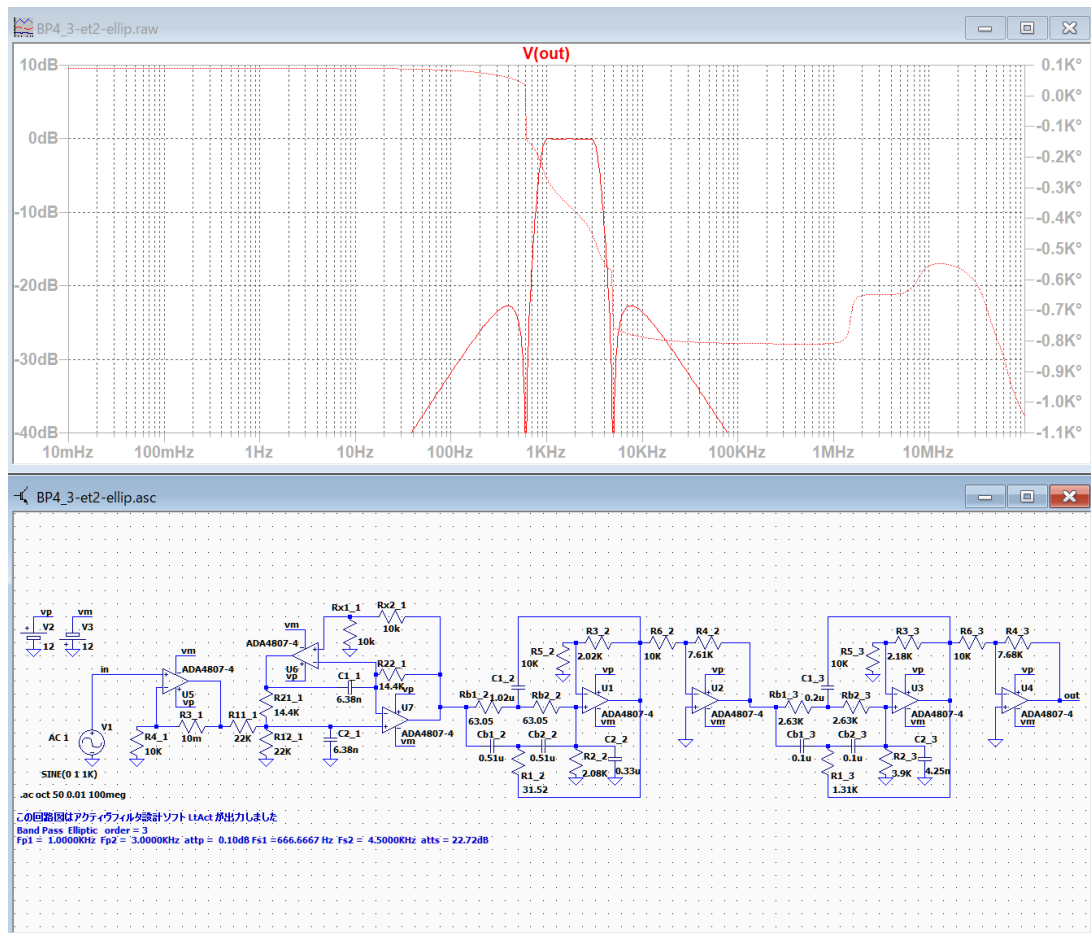
```
c=0.5099679131 u; kr=2*63.0485/(2.0777 K);p0=7.3895 K;p1=447.1818 Meg;p2=0.3987;
```

```
p4=385.6657 Meg;$et2ckr
```

→ Rb= 63.0485 Cb= 0.5099679131 u C1= 1.019935826 u C2= 0.3300516025 u

R1= 31.52425 R2= 2.0777 k R3= 2.024899049 k

R4=7.607364133 k R5=10 k R6=10 k が得られます。



伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ  
バンドエリミネーションフィルタ BE1 と BE2 の  
計算マクロ

## バンドエリミネーションフィルタ BE1 と BE2 の計算マクロ

バターワース、チェビシェフ、逆チェビシェフ、楕円関数のバンドエリミネーションフィルタのマクロ

### et1 を使用する場合 (BE1)

3 次バターワースバンドエリミネーションフィルタ BE1\_3-buf.asc での使用例

#### 伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
2	9.1701K	319.7748Meg	1.6432	0	194.6089Meg

#### 回路図の R と C の値

2 (et1) 「HP3-0-1」 Rb\_2(2 個)=169.4587 K Cb\_2(2 個)= 0.3300 n  
2 R1\_2 =2.0618 K R2\_2 =3.7037 K R3\_2 =6.0858 K R4\_2(5 個)= 10.0000K

et1zr Z=Rb と R=R4 を与えて、BE1 を計算する

バターワース、(逆) チェビシェフ、楕円関数用

rb=Z;r4=R;wc=sqrt(p1);Q=wc/p0;FSF=wc;r1=R/(3\*Q-1);  
R3=p4\*R/p1;R2=R3/p2;cb=1/(Z\*FSF);

z=169.4587 K;R=10 k;p0=9.1701 K;p1=319.7748 Meg;p2=1.6432;

p4=194.6089 Meg;\$et1zr

→ Rb= 169.4587 k Cb= 0.3300000545 n

R1= 2.061778737 k R2= 3.703633772 k R3= 6.085811015 k R4=10 k が得られます。

et1cr C=Cb と R=R4 を与えて、BE1 を計算する

バターワース、(逆) チェビシェフ、楕円関数用

cb=C;r4=R;wc=sqrt(p1);Q=wc/p0;FSF=wc;r1=R/(3\*Q-1);  
R3=p4\*R/p1;R2=R3/p2;rb=1/(C\*FSF)

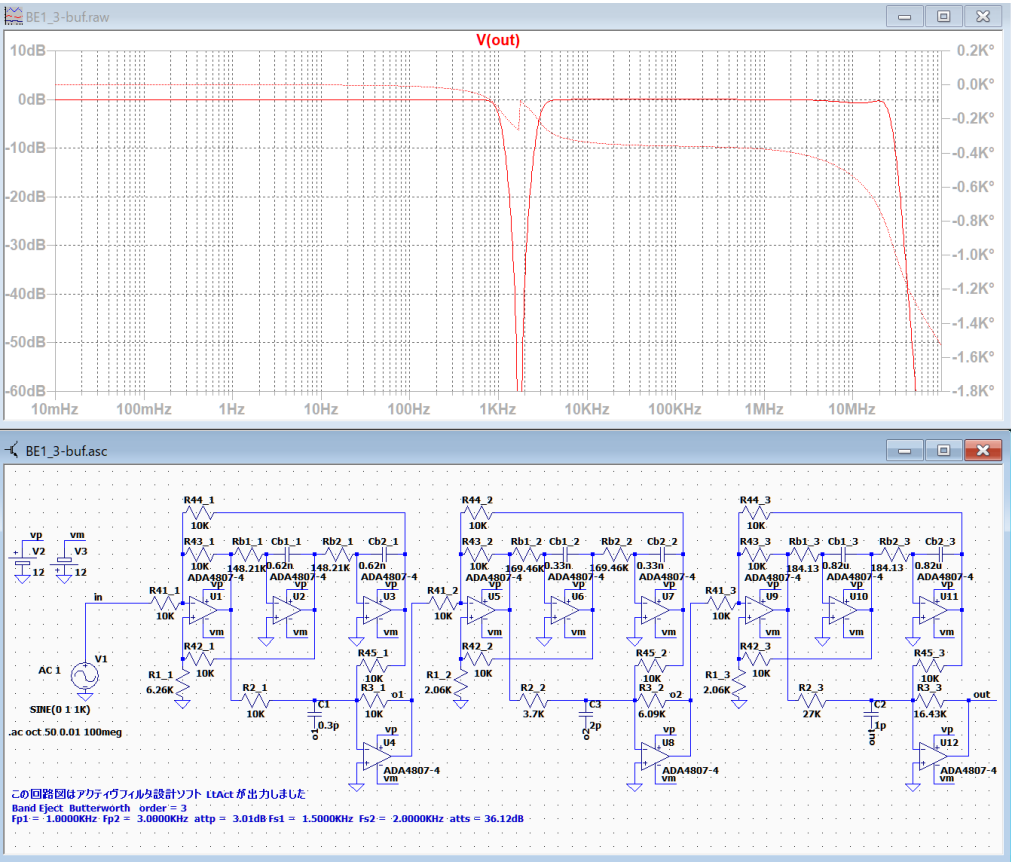
c=0.3300000545 n; R=10 k;p0=9.1701 K;p1=319.7748 Meg;p2=1.6432;

p4=194.6089 Meg;\$et1cr

→ Rb= 169.4587 k Cb= 0.3300000545 n

R1= 2.061778737 k R2= 3.703633772 k R3= 6.085811015 k R4=10 k が得られます。

伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ  
バンドエリミネーションフィルタ BE1 と BE2 の  
計算マクロ



et2 を使用する場合（BE2）

3 次楕円関数バンドエリミネーションフィルタ BE2\_3-ellip.asc での使用例

伝達関数の係数

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
2	4.7893K	268.7015Meg	1.3290	0	202.1797Meg

回路図の R と C の値

2 (et2) 「HP4-0-1」 Rb\_2(2 個)=144.7803 K Cb\_2(2 個)= 0.5600 n

C1\_2=1.1200 n C2\_2=17.6205 p

R1\_2=72.3902 K R2\_2= 330.0000 K R3\_2=1.3191 K

R4\_2=12.4803 K R5\_2= 10.0000 K R6\_2=10.0000K

et2zkr Z=Rb, kr=2\*Rb/R2 を与えて、BE2 を計算する

バターワース、(逆) チェビシェフ、楕円関数用

wc=sqrt(p1); Q=sqrt(p1)/p0; FSF=sqrt(p1/p2); Rb=Z; R2=2\*Rb/kr; R5=10 k;

R6=10 k; kd=(1+kr\*p2)/p2; Cb=1/(Z\*FSF); kk=(kd+kr+4-(sqrt(p2)\*(1+kd)/Q))/4;

R3=(kk-1)\*R5; R4= (1+kr)/kk\*R6; C1=2\*Cb; C2=kd\*Cb/2;

et2 を使用する場合（BE2）

伝達関数の係数を R,C の素子値に変換するマクロのまとめ

バンドエリミネーションフィルタ BE1 と BE2 の

計算マクロ

$z=144.7803 \text{ K}; kr=2*144.7803 \text{ K}/(330.0000 \text{ K}); p0=4.7893 \text{ K};$

$p1=268.7015 \text{ Meg}; p2=1.3290; p4=202.1797 \text{ Meg}; \text{\$set2zkr}$

→  $R_b = 144.7803 \text{ k}$   $C_b = 0.5599951225 \text{ n}$   $C_1 = 1.119990245 \text{ n}$   $C_2 = 17.62549803 \text{ p}$

$R_1 = 72.39015 \text{ k}$   $R_2 = 330.000 \text{ k}$   $R_3 = 1.319159171 \text{ k}$   $R_4 = 12.4802 \text{ k}$  が得られます。

et2ckr  $C=C_b$ ,  $kr=2*R_b/R_2$  を与えて、BE2 を計算する

バターワース、(逆) チェビシェフ、楕円関数用

$wc=\sqrt{p1}$ ;  $Q=\sqrt{p1}/p0$ ;  $FSF=\sqrt{p1/p2}$ ;  $C_b=C$ ;  $R_b=1/(C*FSF)$ ;  $R_2=2*R_b/kr$ ;

$R_5=10 \text{ k}$ ;  $R_6=10 \text{ k}$ ;  $kd=(1+kr-p2)/p2$ ;  $kk=(kd+kr+4-(\sqrt{p2}*(1+kd)/Q))/4$ ;

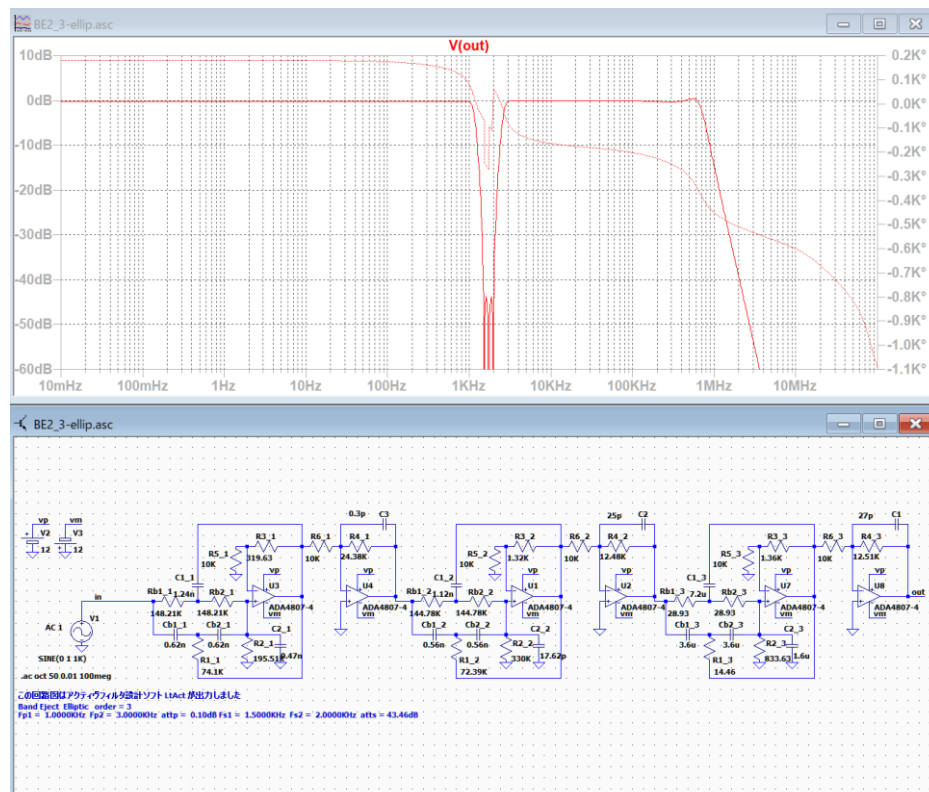
$R_3=(kk-1)*R_5$ ;  $R_4=(1+kr)/kk*R_6$ ;  $C_1=2*C_b$ ;  $C_2=kd*C_b/2$ ;

$c=0.5599951225 \text{ n}$ ;  $kr=2*144.7803 \text{ K}/(330.0000 \text{ K}); p0=4.7893 \text{ K};$

$p1=268.7015 \text{ Meg}; p2=1.3290; p4=202.1797 \text{ Meg}; \text{\$set2ckr}$

→  $R_b = 144.7803 \text{ k}$   $C_b = 0.5599951225 \text{ n}$   $C_1 = 1.119990245 \text{ n}$   $C_2 = 17.62549803 \text{ p}$

$R_1 = 72.39015 \text{ k}$   $R_2 = 330.000 \text{ k}$   $R_3 = 1.319159171 \text{ k}$   $R_4 = 12.4802 \text{ k}$  が得られます。



基本回路とコンデンサの推奨値

ローパスフィルタ

lp1 の C1 の値

lp1 (1次)	C1の値
周波数 KHz	
1	1n
10	0.1n
100	10p
1000	10p

LP1 の C1\_1 の値

LP1	C1_1の値		
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	10n	1n	0.5n
10	1n	0.1n	0.1n
100	1n	1n	0.1n
1000	1n	1n	0.1n

LP2 の C1\_1 の値

LP2	C1_1の値		
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	10n	1n	1n
10	1n	1n	1n
100	1n	1n	0.1n
1000	1n	0.1n	0.1n

LP3 の Cb1\_1 の値

LP3(et1)	Cb1_1の値	LtAct ver.1.45	
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	10u	8.2u	3u
10	1.2u	0.9u	0.4u
100	120n	90n	40n
1000	18n	10n	4n

LP4 の Cb1\_1 の値

LP4(et2)	Cb1_1の値	LtAct ver.1.45	
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	3u	1u	0.1u
10	0.2u	0.1u	20n
100	20n	10n	2n
1000	2n	1n	0.2n



ハイパスフィルタ

hp1 の C1 の値

hp1 (1次)	C1の値
周波数 KHz	
1	1n
10	0.1 n
100	10 p
1000	10p

HP1 の C1\_1 の値

HP1	C1_1の値		
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	1n	1n	1n
10	100p	100p	100p
100	50p	50p	50p
1000	30p	30p	30p

HP2 の C1\_1 の値

HP2	C1_1の値		
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	1n	1n	1n
10	100p	100p	100p
100	50p	50p	50p
1000	30p	30p	30p

HP3 の Cb1\_1 の値

HP3(et1)	Cb1_1の値		
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	1n	1n	1n
10	100p	100p	100p
100	50p	50p	50p
1000	30p	30p	30p

HP4 の Cb1\_1 の値

HP4(et2)	Cb1_1の値		
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	1n	1n	1n
10	100p	100p	100p
100	75p	75p	75p
1000	200p	200p	200p

## バンドパスフィルタ

BP1 の C1\_1 の値

BP1	C1_1の値		
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	1n	1n	1n
10	100p	100p	100p
100	50p	50p	50p
1000	30p	30p	30p

BP2 の C1\_1 の値

BP2	C1_1の値		
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	1n	1n	1n
10	100p	100p	100p
100	50p	50p	50p
1000	30p	30p	30p

BP3(et1)の Cb1\_1 の値

BP3(et1)	Cb1_1の値		奇数ブロック用
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	10u	8.2u	3u
10	1.2u	0.9u	0.4u
100	120n	90n	40n
1000	18n	10n	4n
BP3(et1)	Cb1_1の値		偶数ブロック用
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	1n	1n	1n
10	100p	100p	100p
100	50p	50p	50p
1000	30p	30p	30p

BP4(et2)の Cb1\_1 の値

BP4(et2)	Cb1_1の値	奇数ブロック用	
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	3u	1u	0.1u
10	0.2u	0.1u	20n
100	20n	10n	2n
1000	2n	1n	0.2n
BP4(et2)	Cb1_1の値	偶数ブロック用	
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	1n	1n	1n
10	100p	100p	100p
100	75p	75p	75p
1000	200p	200p	200p

## バンドイジェクト

BE1(et1)の Cb1\_1 の値

BE1(et1)	Cb1_1の値	奇数ブロック用	
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	1n	1n	1n
10	100p	100p	100p
100	50p	50p	50p
1000	30p	30p	30p
BE1(et1)	Cb1_1の値	偶数ブロック用	
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	10u	8.2u	3u
10	1.2u	0.9u	0.4u
100	120n	90n	40n
1000	18n	10n	4n

BE2(et2)の Cb1\_1 の値

BE2(et2)	Cb1_1の値	奇数ブロック用	
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	1n	1n	1n
10	100p	100p	100p
100	75p	75p	75p
1000	200p	200p	200p
BE2(et2)	Cb1_1の値	偶数ブロック用	
周波数 KHz	Q = 5	Q = 2	Q = 1
1	3u	1u	0.1u
10	0.2u	0.1u	20n
100	20n	10n	2n
1000	2n	1n	0.2n

## 楕円関数フィルタの伝達関数の係数を計算するサンプルプログラム

```

#define MAX    210

double  g,p1,q1,r1,tm,f0,fd,fd0,fs,
        fpp,attp,fss,atts,w0,ep=1e-10;
double  pi = M_PI;
double  h,k,kd,kb,u,ks,kds;
double  DK,kk,kk1,fdd;
double  ee,e,tp,a,sigma,ch;
double  aa[MAX],pp[MAX];
double  ff[MAX],z[MAX],w[MAX],cc[MAX],dd[MAX],bb[MAX];
double  s[MAX],qq[MAX],zw[MAX],zf[MAX],zq[MAX];
int      odd,nin,n,m,em,rr,tt;

double  intg(double    k)    /* 完全楕円積分  $K(k)$  を計算する */
{
    double  a,b,c,d;
    int      i;
    a = 1.0;
    b = sqrt(1-k*k);
    for(i=0;i<50;i++){
        c = (a+b)/2.0;
        d = sqrt(a*b);
        if((c-b) < c*ep)  break;
        a = c;
        b = d;
    }
    a = c;
    return  (pi/2.0/a);
}

```

```

／＊ 楕円正弦関数  $sn(u, k)$  を計算する ＊／

double sn(double u, double k)
{
double sn, q, v, w0;
int j;
q = exp(-pi*kk1/kk);
v = pi/2.0*u/kk;
sn = 0.0;
for(j=0; j<50; j++){
w0 = pow(q, j+.5);
sn += w0*sin((2.0*j+1.0)*v)/(1-w0*w0);
if(w0 < ep) break;
}
return (sn*2.0*pi/k/kk);
}

void cal_prod(int sn)
{
int i, j;
bb[0] = s[1]; bb[1] = 1.0; j = 1;
loop_prod:
j++;
aa[0] = s[j]*bb[0];
for(i=1; i<=j-1; i++) aa[i] = bb[i-1]+s[j]*bb[i];
for(i=0; i<=j-1; i++) bb[i] = aa[i];
bb[j] = 1.0;
if(j<sn) goto loop_prod;
}

```

```
/* f0における減衰量を計算する */
void cal_loss(double f0)
{
    int i;
    double w0,ww,bf1,bf2,bf3;
    w0 = tp*f0;    ww = w0*w0;    a = kk;
    for(i=1;i<=m/2;i++){
        bf1 = pow(zw[i],2.0);    bf2 = pow(ww-bf1,2.0);
        bf3 = pow(w0*zw[i]/zq[i],2.0);
        a += 10.0*log10(bf2+bf3);
    }
    for(i=1;i<=n;i++){
        bf1 = pow(w[i],2.0);    bf2 = pow(ww-bf1,2.0);
        a -= 10.0*log10(bf2);
    }
    if(m>em)    a += 10.0*log10(ww+pow(sigma,2.0));
}
```



／＊ ベアストウ法により、２次式と１次式の因子の係数を計算する ＊／

```

void    cal_p_q()
{
    int    i,i1,x1,x2,x3;
    double p,q,x4,ddp,dq;
        for(i=1;i<=tt;i++)    aa[i] /= aa[0];
        aa[0] = bb[0] = cc[0] = 1.0;    i1 = 0;
loop_p_q2:
        p = q = 0.0;    i1++;
loop_p_q1:
        bb[1] = aa[1] - p;cc[1] = bb[1] - p;
        for(i=2;i<=tt;i++)    bb[i] = aa[i] - p*bb[i-1]-q*bb[i-2];
        for(i=2;i<=tt-1;i++)    cc[i] = bb[i] - p*cc[i-1]-q*cc[i-2];
        x1 = tt-1;    x2 = tt-2;    x3 = tt-3;
        x4 = pow(cc[x2],2.0)+cc[x3]*(bb[x1]-cc[x1]);
        if(x4 == 0.0)    x4 = 0.001;
        ddp = (bb[x1]*cc[x2]-bb[tt]*cc[x3])/x4;    p += ddp;
        dq = (bb[tt]*cc[x2]-bb[x1]*(cc[x1]-bb[x1]))/x4;    q += dq;
        if(fabs(ddp)+fabs(dq)>1e-6)    goto    loop_p_q1;
        pp[i1] = p;    qq[i1] = q;    aa[1] -= p;    tt -= 2;
        for(i=2;i<=tt;i++)    aa[i] -= (p*aa[i-1]+q*aa[i-2]);
        if(tt>2) goto    loop_p_q2;
        if(tt == 2)    {
            i1++;    pp[i1] = aa[1];    qq[i1] = aa[2];
        }
        if(tt == 1)    a = -aa[1];
}

```

／＊  $Q^2(s)$  の各次数の係数を計算する ＊／

```
void    cal_qz0
{
int      i;
double  d;
    for(i=1;i<=nin;i++)      s[i] = -1;
    for(i=nin+1;i<=nin+n;i++)      s[i] = -pow(z[i-nin],2.0);
    for(i=nin+n+1;i<=nin+2*n;i++)  s[i] = s[i-n];      cal_prod(m);
    d = pow(-1,nin);
    for(i=0;i<=2*m;i += 2)    dd[i] = d*bb[i/2];
}
```

／＊  $\varepsilon^2 C^2 \left( \frac{s}{\omega_p} \right)^{2nin} \prod_v \left[ s^2 + \left( x_{zv} \omega_p \right)^2 \right]^2$  の各次数の係数を計算する ＊／

```
void    cal_fz2(int      i)
{
int      j,ji,jf;
    if(i<em+2)      {
        ji = 0;    jf = i;
    }
    if(i>em) {
        ji = i-em;    jf = em;
    }
    cc[i] = 0;
    for(j=ji;j<=jf;j += 2)      cc[i] += aa[j]*aa[i-j];
}
```

```
void    cal_fz()
{
int      i;
    for(i=1;i<=nin;i++)      s[i] = 1;
    for(i=nin+1;i<=nin+n;i++)      s[i] = z[i-nin];
    for(i=nin+n+1;i<=nin+2*n;i++)  s[i] = z[i-nin-n];
    i--;
    cal_prod(i);
    for(i=0;i<=em;i += 2)    aa[i] = e*bb[i];
    for(i=0;i<=2*em;i += 2)  cal_fz2(i);
}
```

／＊  $E(s)$  を計算する、メインプログラム (j はフィルタの次数)

k は  $f_p/f_s$  の値, fd0はカットオフ周波数  $f_p$

$$H_m(\omega_p, s) = \frac{\prod_{v=1}^{m/2} [s^2 + (x_v \omega_p)^2]}{C_H \prod_{v=1}^{m/2} [s^2 + p_v s + q_v]} \text{ において、}$$

$$p_v = ZW[i]/ZQ[i], \quad q_v = \{ZW[i]\}^2, \quad x_v \omega_p = W[i] \quad * /$$

```

void    zero_find(int    j)
{
int      i;
double  d;
    for(i=0;i<MAX;i++){
        aa[i] = 0.0;    bb[i] = 0.0;    cc[i] = 0.0;    dd[i] = 0.0;
        pp[i] = 0.0;    s[i] = 0.0;    z[i] = 0.0;    w[i] = 0.0;
        zf[i] = 0.0;    zq[i] = 0.0;    qq[i] = 0.0;    zw[i] = 0.0;
    }
    kd = sqrt(1.0-k*k);
    ee = pow(10.0,0.1*attp)-1.0;    /*  ε2 */
    e = sqrt(ee);    /*  ε */
    kk = intg(k);    /*  kk = K(k) */

    kk1 = intg(kd);    /*  kk1 = K'(k) */

    if(odd){
        for(i=1;i<=(j-1)/2;i++) ff[i]=1/k/sn(kk*i*2/j,k)*fd0;
    }
    else
        for(i=1;i<=j/2;i++)    ff[i]=1/k/sn(kk*(i*2-1)/j,k)*fd0;
    fdd = fd0*fd0;
    n = j/2;
    nin = (j - (j/2)*2);
    m = nin + 2*n;
    em = 2*(m/2);

```

```

    tp = 2.0*pi;
    kk = 0.0;      rr = 0;
    tt = m;
    for(i=1;i<=n;i++){
        z[i] = sqrt(1.0-fdd/ff[i]/ff[i]);
        w[i] = tp * ff[i];
    }
    cal_fz();
    cal_qz();
    if(m>em)      cc[2*m] = 0;
    for(i=0;i<=2*m;i += 2)  aa[m-i/2] = cc[i]+dd[i];
    cal_p_q();
loop_zf:
    rr++;  d = 1.0+pp[rr]+qq[rr];
    bb[rr] = (1.0+pp[rr]/2.0)*fdd/d;
    zf[rr] = fd0/pow(d,0.25);
    zq[rr] = 1/sqrt(2.0*(1-bb[rr]/pow(zf[rr],2.0)));
    zw[rr] = tp*zf[rr];
    if(rr<em/2)    goto    loop_zf;
    if(m>em)      sigma = sqrt(fdd/(a-1.0))*tp;
    cal_loss(fd0);
    kk = attp - a;
    ch = pow(10.0,0.05*kk);
}

```

Vector で公開中のソフトとデータ

Vector で公開中のソフトとデータ

作者: 三浦 高志 (vector.co.jp)

汎用データ/画像&サウンド

●[キャプチャ NX の使用方法](#)

ニコンキャプチャ NC と NX の使用方法の説明

●[キャプチャ NX の画像調整データ](#)

「キャプチャ NX の使用方法」の本文中で使用した画像と調整データ

●[ニコンキャプチャ NX2-調整手順](#)

ニコンキャプチャ NX2 の操作に慣れるための調整手順を説明

●[ニコンキャプチャ NX2-撮影練習](#)

ニコンデジタル一眼レフカメラの撮影練習 — 露出設定を重点的に説明

汎用データ/学習&教育

●[LTSpice 操作入門](#)

アナログ電子回路のシミュレーション操作入門

●[アクティブフィルタの設計と合成](#)

フィルターの伝達関数を回路の素子値に変換して回路図ファイルを出力する

WindowsMe/98/95 用ソフト/学習&教育

●[Sim for DOS](#)

アナログ回路の DC 及び AC 解析の出来るシミュレーションソフト

●[SimPack](#)

フリーソフトとして公開中の Sim.exe の開発資料とプログラムソースを公開する

Windows11/10/8/7/Vista/XP/2000/NT/画像&サウンド

●[ぬり絵ビルダー](#)

画像データ (BMP または JPG) を自動的にぬりえに変換する

Windows11/10/8/7/Vista/XP/2000/NT/学習&教育

●[McAct2W](#)

アナログフィルタ (回路図出力付き) 及びデジタルフィルタの設計支援ソフト

●[LtAct](#)

アクティブフィルタの設計と LTSpice 用の回路図作成

●[ActDoc](#)

フリーソフトとして公開中の McAct2W.exe のプログラム開発資料を公開する

●[ActiveFilter-Design-Schematics](#)

LtAct の名称を変更し、取扱説明書の一部を英文に翻訳しました

Windows11/10/8/7/Vista/XP/2000/NT/パーソナル

●[電卓プログラム Dt\\_.exe](#)

複素数の計算が出来て、関数も自作できる 組み込み関数は複素数処理に対応

Windows11/10/8/7/Vista/XP/2000/NT/画像&サウンド

●[カラーコーディネイタ](#)

色彩調整における「色と補色の確認」ツール

●[TIFF 圧縮](#)

RGB 各 16 ビットの TIFF データを高画質に圧縮/伸張するプログラム

●[EV 計算](#)

デジタル一眼レフの露出情報を入力すると EV 値(撮影環境の明るさ)を計算する

汎用データ/学習&教育

●[英語-地球の歴史](#)

辞書なしでも、何度も読むだけで単語と文法が分かってくると思います

●[星の王子さま-スペイン語](#)

辞書なしでも、何度も読むだけで単語と文法が分かってくると思います

●[異邦人-スペイン語](#)

辞書なしでも、何度も読むだけで単語と文法が分かってくる

●[星の王子さま-ドイツ語](#)

辞書なしでも、何度も読むだけで単語と文法が分かってくると思います

●[星の王子さま-英語](#)

辞書なしでも、何度も読むだけで単語と文法が分かってくると思います

●[スペイン語学習](#)

構文解析によるスペイン語学習

●[星の王子様-フランス語](#)

辞書なしでも、何度も読むだけで単語と文法が分かってくると思います

●[フランス語学習](#)

構文解析によるフランス語学習

●[星の王子様-イタリア語](#)

辞書なしでも、何度も読むだけで単語と文法が分かってくると思います

●[英語-アル・ゴアからのメッセージ](#)

気候危機に関するアル・ゴア元副大統領の講演

Vector で公開中のソフトとデータ

- [異邦人・フランス語](#)

辞書なしでも、何度も読むだけで単語と文法が分かってくると思います

- [異邦人・英語](#)

辞書なしでも、何度も読むだけで単語と文法が分かってくると思います

Windows11/10/8/7/Vista/XP/2000/NT/画像&サウンド

- [HDPPhotoTool \(HD フォトツール\)](#)

TIF(RGB48bit または RGB24bit)または BMP ファイルを HDP 形式に圧縮して TIF 形式に伸張

汎用データ/家庭&趣味

- [北海道の家庭菜園](#)

寒冷地における苗の植付と栽培方法および野菜の育苗を体験に基づいて説明