

# 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

## 目次

目次.....	1
はじめに .....	6
基本回路ブロックの図.....	7
1 次のローパスフィルタ基本回路  lp1.....	7
1 次のハイパスフィルタ基本回路  hp1.....	8
2 次のローパスフィルタ基本回路  LP1 .....	9
2 次のローパスフィルタ基本回路  LP2 .....	10
2 次のハイパスフィルタ基本回路  HP1 .....	11
2 次のハイパスフィルタ基本回路  HP2 .....	12
1 次のバンドパスフィルタ基本回路  BP1 .....	13
1 次のバンドパスフィルタ基本回路  BP2 .....	14
BE フィルタ及び各種フィルタ用の基本回路  BE1.....	15
BE フィルタ及び各種フィルタ用の基本回路  BE2.....	16
フィルタの遮断特性とフィルタ特性による回路の構成 .....	17
表の見方.....	18
ローパスフィルタのファイル名と回路構成について、 .....	19
ハイパスフィルタのファイル名と回路構成について、 .....	19
バンド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、 .....	21
ver.3.10 基本回路図を追加 .....	22
回路構成の例 .....	23
ローパスフィルタ .....	23
ハイパスフィルタ .....	27
バンドパスフィルタ .....	31
バンドエリミネーションフィルタ .....	35
LtAct のダイアログの用語と入力方法について .....	37
ローパスフィルタの場合 .....	37
バターワースを設計する時.....	38
チェビシェフローパスフィルタの場合.....	39
逆チェビシェフローパスフィルタの場合 .....	41
楕円関数ローパスフィルタの場合 .....	43
ハイパスフィルタ .....	45
バターワースフィルタを設計する時 .....	46
チェビシェフフィルタを設計する時 .....	47

逆チェビシェフフィルタを設計する時.....	48
楕円関数フィルタを設計する時.....	49
バンドパスフィルタ .....	50
バターワースフィルタを設計する時 .....	51
チェビシェフ、逆チェビシェフ、楕円関数を設計する時 .....	52
バンドエリミネーションフィルタ.....	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
LtAct によるフィルターの設計手順.....	56
設計 1 バターワース・ローパスフィルタ .....	56
1. 最初に、設計するフィルタの種類を決定する。 .....	56
4. 伝達関数の係数を出力します。「OK」を押します。 .....	57
6. 係数リスト(journal.txt)を確認する。 .....	58
7. 回路図のファイルを出力する。 .....	59
設計したフィルターを合成する.....	60
8. 回路図のファイル名を入力する。 .....	61
1 1. 2 番目の素子値も同様に「OK」を押す。 .....	62
1 4. 「LTSpice」で周波数特性をシミュレーションする。 .....	63
設計 2 楕円関数・ローパスフィルタ .....	64
パラメータの入力.....	64
伝達関数の係数を確認する。 .....	65
回路図作成 .....	66
周波数特性を確認する。 .....	67
回路図の素子値を確認する .....	68
設計 3 チェビシェフ・ハイパスフィルタ .....	69
周波数特性のグラフ .....	69
伝達関数の係数を確認 .....	69
回路図と周波数特性.....	70
素子値の確認.....	70
設計 4 逆チェビシェフ・ハイパスフィルタ .....	71
フィルタの選択 .....	71
周波数特性のグラフ .....	71
設計の結果 .....	71
伝達関数の係数を確認 .....	72
回路図と周波数特性.....	72
素子値の確認.....	73

設計 5 逆チェビシェフ・バンドパスフィルタ .....	74
周波数特性のグラフ .....	74
伝達関数の係数を確認 .....	74
回路図と周波数特性 .....	75
素子値の確認 .....	76
設計 6 楕円関数・バンドエリミネーションフィルタ .....	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 .....	79
設計 7 楕円関数・バンドパスフィルタ .....	81
伝達関数の係数 .....	81
調整後の周波数特性 .....	83
素子値の確認 .....	84
フィルタごとの伝達関数と素子値の決定方法 .....	86
ローパスフィルタ .....	86
バターワース 伝達関数 .....	86
チェビシェフ 伝達関数 .....	87
バターワースとチェビシェフ R,C 素子値の決定方法 .....	88
逆チェビシェフ 伝達関数 .....	93
逆チェビシェフ R,C 素子値の決定 .....	94
楕円関数 伝達関数 .....	98
楕円関数 R,C 素子値の決定 .....	100
ハイパスフィルタ .....	104
バターワース 伝達関数 .....	104
チェビシェフ 伝達関数 .....	105
バターワースとチェビシェフ R,C 素子値の決定 .....	106
逆チェビシェフ 伝達関数 .....	110
逆チェビシェフ R,C 素子値の決定 .....	111
楕円関数 伝達関数 .....	115
楕円関数 R,C 素子値の決定 .....	117
バンドパスフィルタ .....	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
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 .....	131
楕円関数 伝達関数.....	138
楕円関数 R,C 素子値の決定 .....	140
バンドエリミネーションフィルタ .....	148
バターワース 伝達関数 .....	148
バターワース R,C 素子値の決定 .....	149
チェビシェフ 伝達関数 .....	156
チェビシェフ R,C 素子値の決定 .....	157
逆チェビシェフ 伝達関数.....	164
逆チェビシェフ R,C 素子値の決定.....	166
楕円関数 伝達関数.....	173
楕円関数 R,C 素子値の決定 .....	175
基本回路とコンデンサの推奨値 .....	184
ローパスフィルタ .....	184
lp1 の C1 の値 .....	184
LP1 の C1_1 の値.....	184
LP2 の C1_1 の値.....	184
LP3 の Cb1_1 の値.....	185
LP4 の Cb1_1 の値.....	185
ハイパスフィルタ .....	186
hp1 の C1 の値 .....	186
HP1 の C1_1 の値 .....	186
HP2 の C1_1 の値 .....	186
HP3 の Cb1_1 の値 .....	187
HP4 の Cb1_1 の値 .....	187
バンドパスフィルタ .....	188
BP1 の C1_1 の値 .....	188
BP2 の C1_1 の値 .....	188
BP3(et1)の Cb1_1 の値.....	188
BP4(et2)の Cb1_1 の値.....	189
バンドイジェクト .....	190
BE1(et1)の Cb1_1 の値 .....	190
BE2(et2)の Cb1_1 の値 .....	190
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.....	191
Vector で公開中のソフトとデータ .....	199



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ー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、そのフィルター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ー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ー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、フィルター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ーの係数を利用して、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

## 基本回路ブロックの図

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

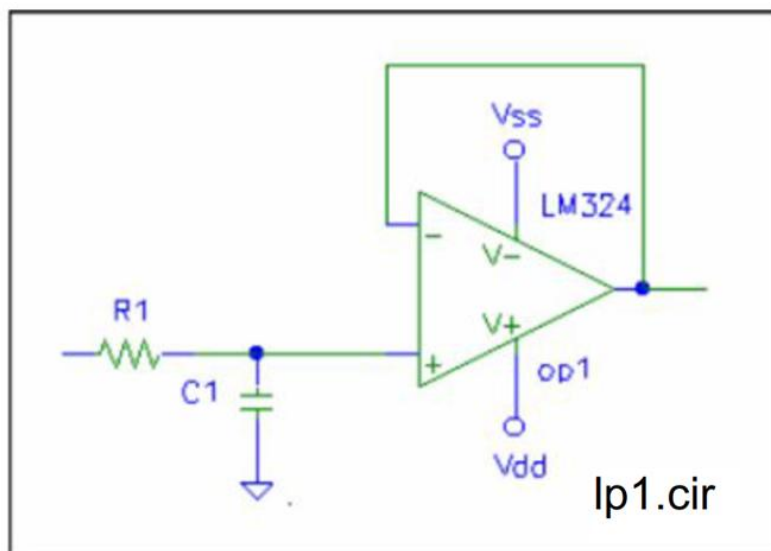


図 2-1 1 次のローパスフィルタ基本回路 1 lp1\_1.cir

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

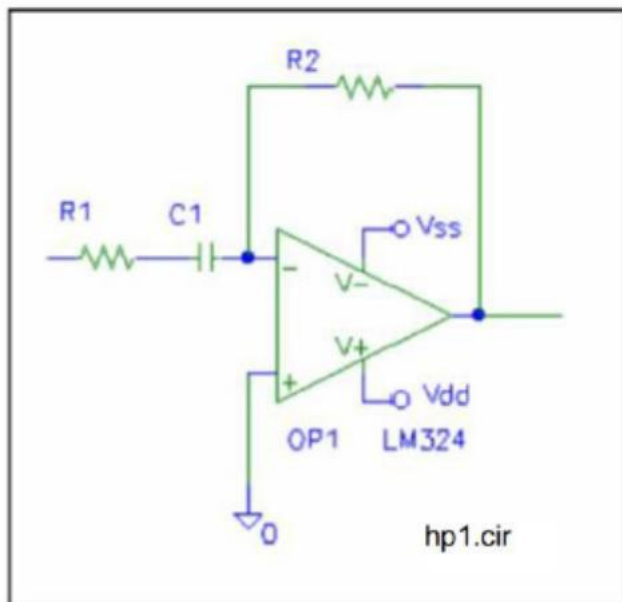


図 4 - 1 1 次のハイパスフィルタ基本回路 hp1.cir

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

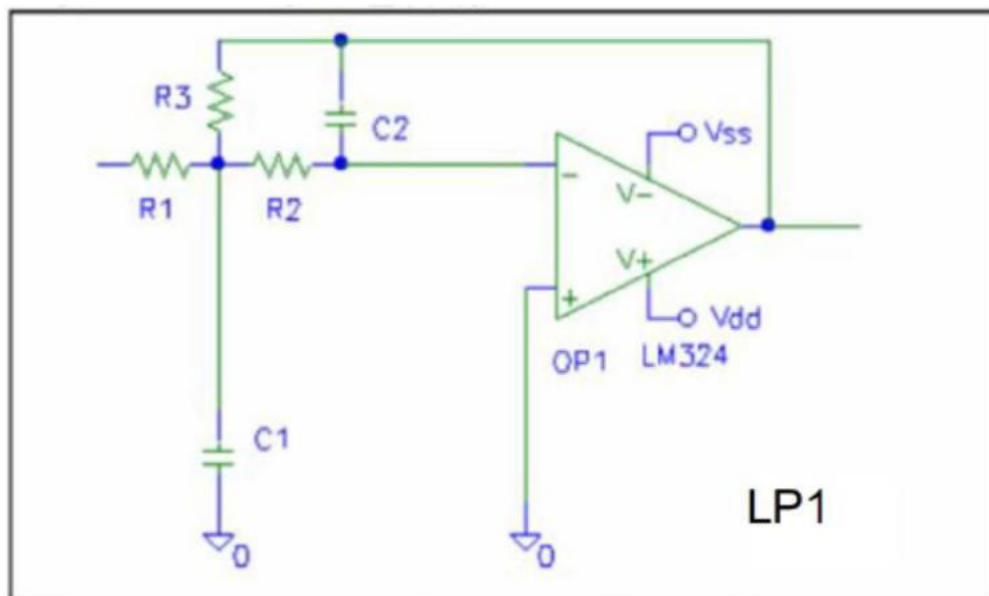


図 2 - 3 2 次のローパスフィルタ基本回路 LP1 (lpat1\_2.cir)

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

LP1 の伝達関数

Transfer function of LP1

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

## 2 次のローパスフィルタ基本回路 LP2

2nd order low-pass filter basic circuit LP2

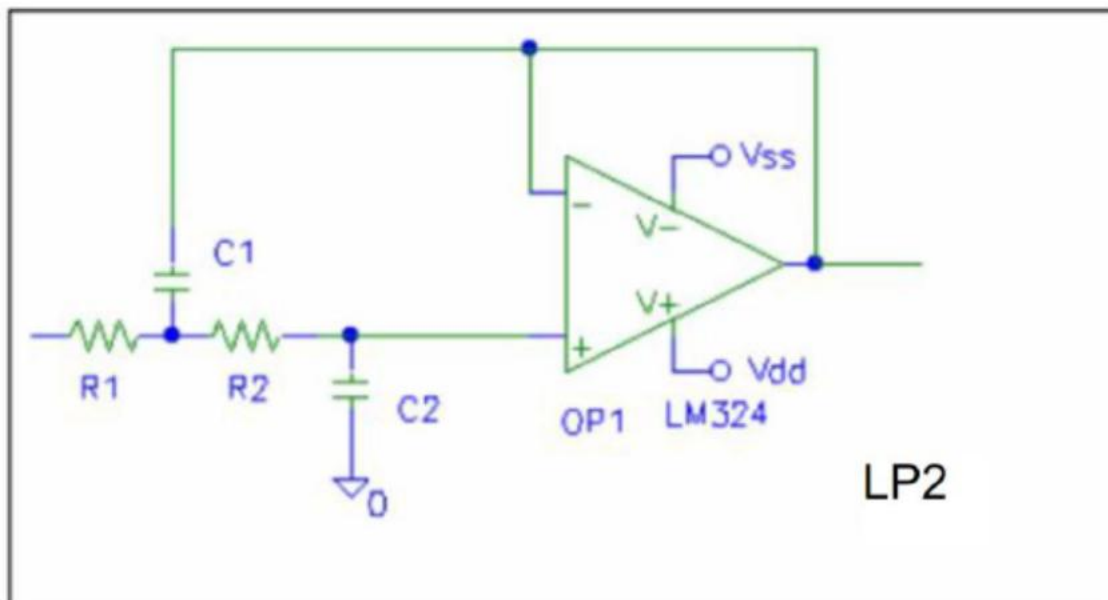


図 2 - 4 2 次のローパスフィルタ基本回路 LP 2 (lpat2\_2.cir)

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

LP 2 の伝達関数

Transfer function of LP2

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

## 2 次のハイパスフィルタ基本回路 HP1

2nd order high-pass filter basic circuit HP1

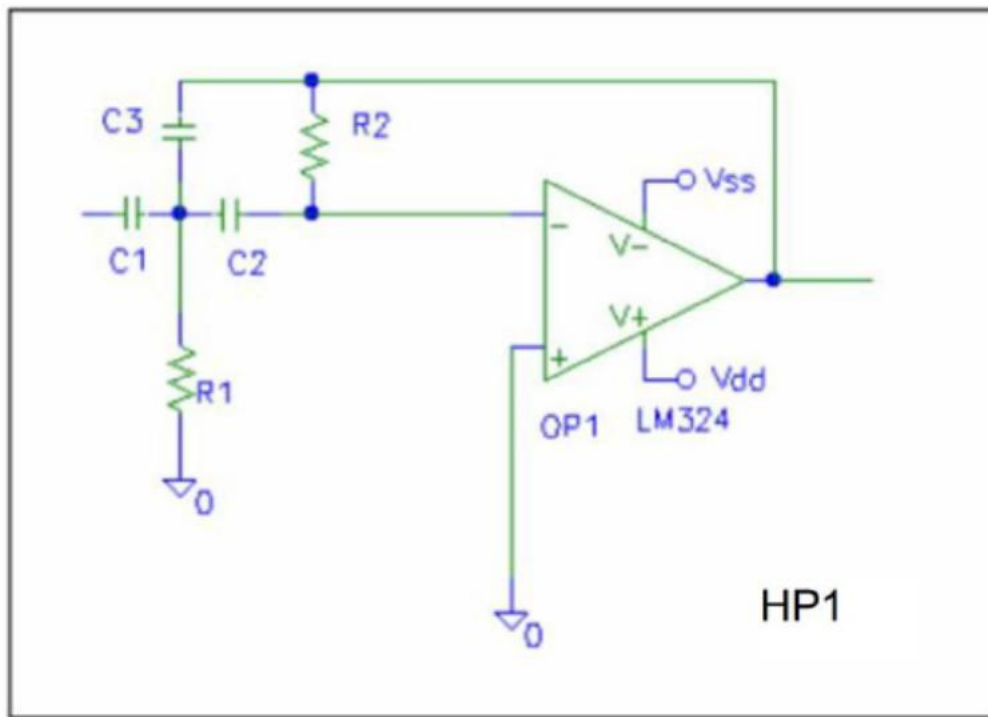


図 4 - 2 2 次のハイパスフィルタ基本回路 H P 1 (hpat1\_2.cir)

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

H P 1 の伝達関数

Transfer function of HP1

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

## 2 次のハイパスフィルタ基本回路 HP2

2nd order high-pass filter basic circuit HP2

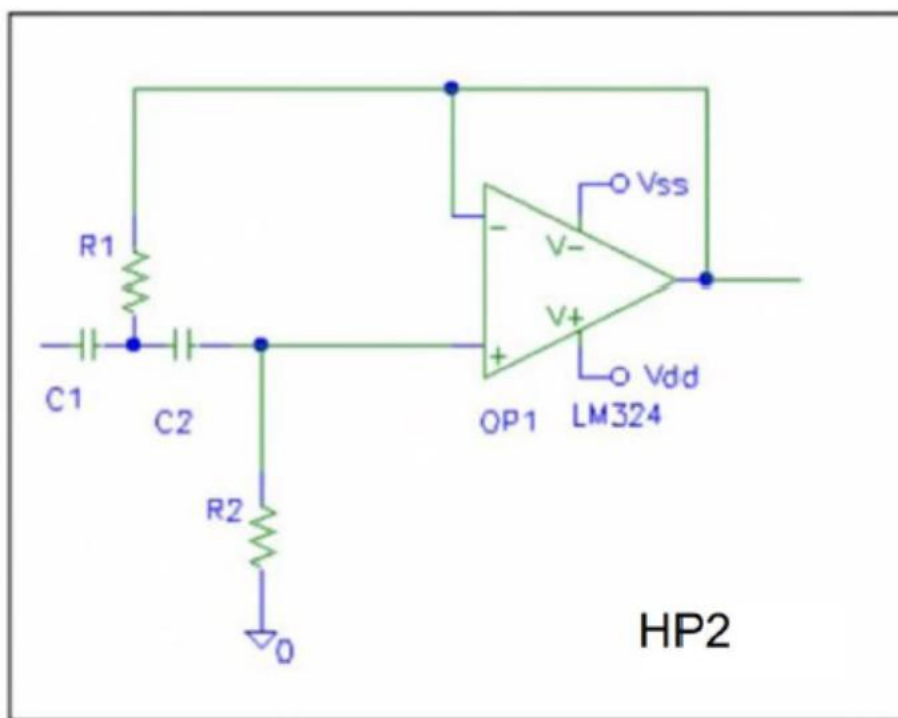


図 4 - 3 2 次のハイパスフィルタ基本回路 H P 2 (hpat2\_2.cir)

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

H P 2 の伝達関数

Transfer function of HP2

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

## 1 次のバンドパスフィルタ基本回路 BP1

1st order bandpass filter basic circuit BP1

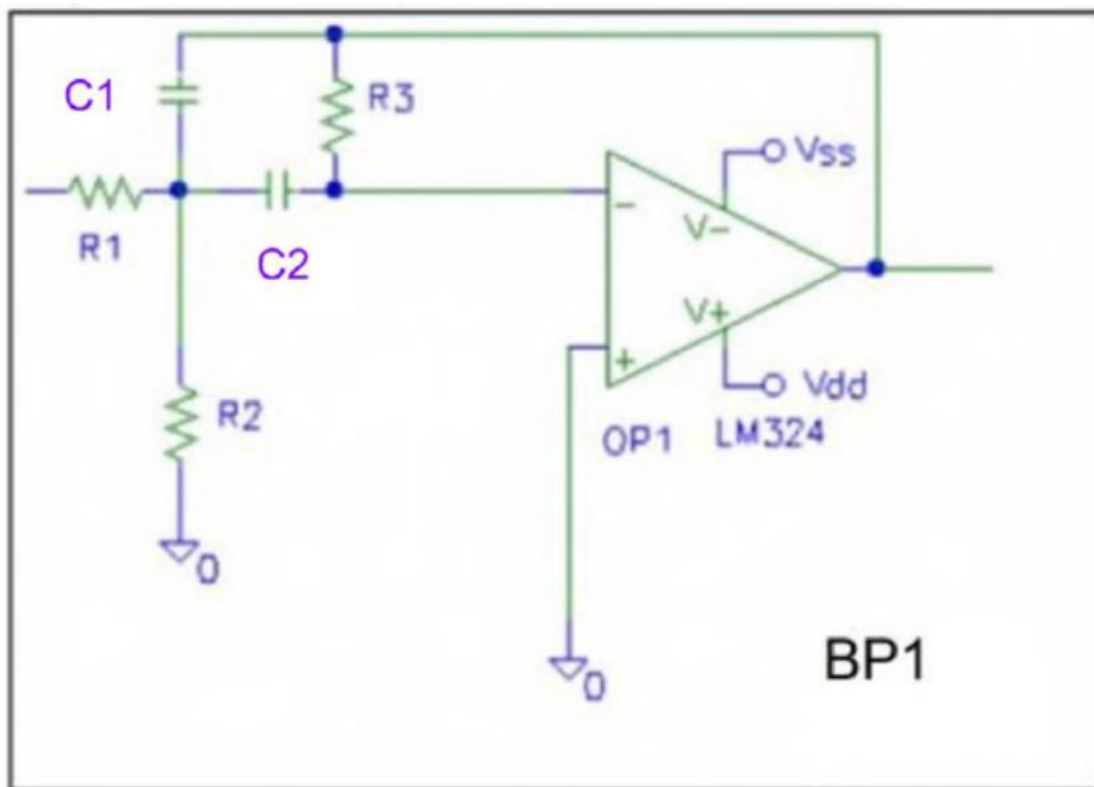


図 6 - 1 1 次のバンドパスフィルタ基本回路 B P 1 (bpat1.cir)

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

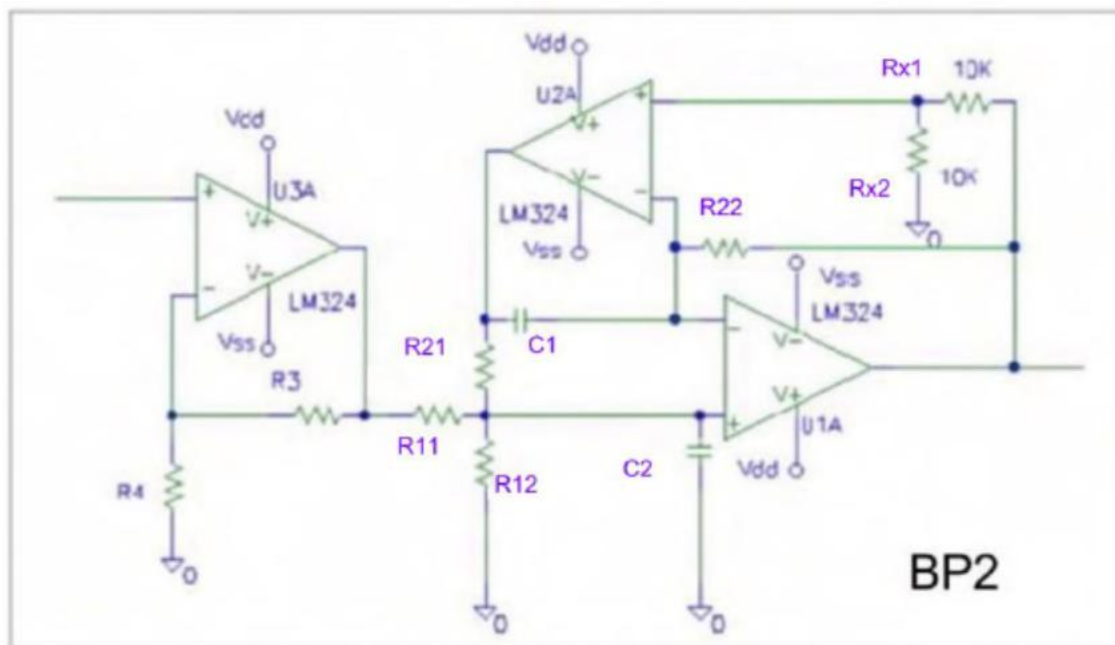


図 6 - 2 1 次のバンドパスフィルタ基本回路 B P 2 (bpat2.cir)

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

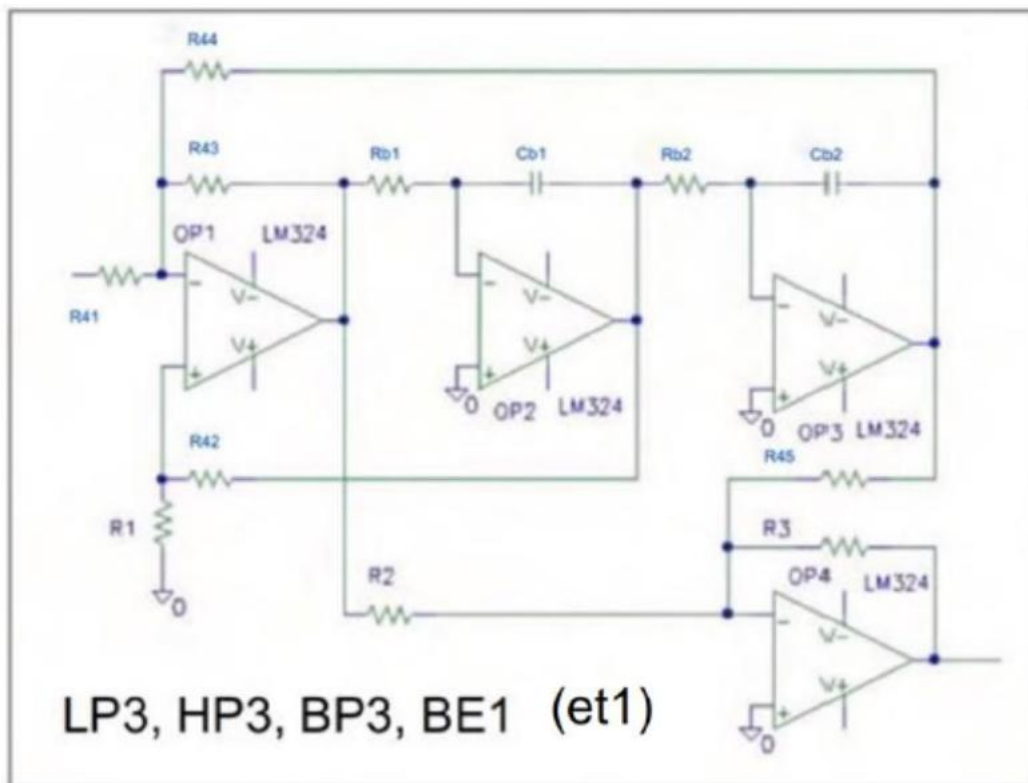


図 2-5 2 次のローパスフィルタその他で利用される基本回路 (lpet1\_2.cir)

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)

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

## 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

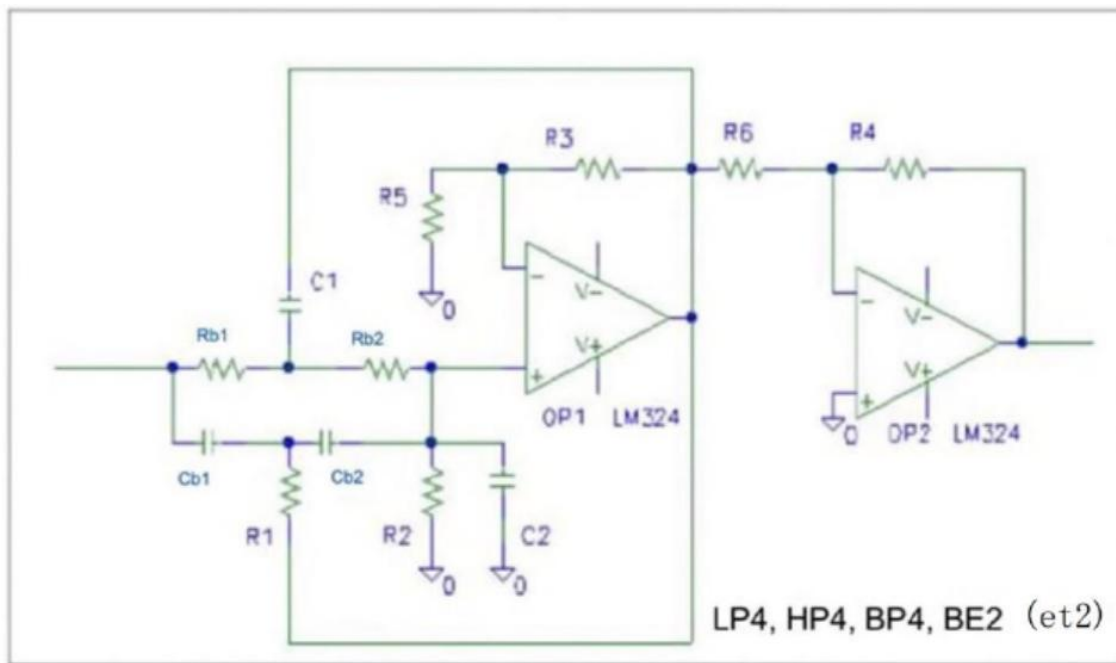


図 2-6 2 次のローパスフィルタその他で利用される基本回路 (lpet2\_2.cir)

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)

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

$$R_1 = \frac{R_b}{2}, C_1 = 2 \cdot C_b, R_2 = \frac{2 \cdot R_b}{kr}, C_2 = \frac{kd \cdot C_b}{2}, R_3 = (kk-1) \cdot R_5$$

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、

**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、

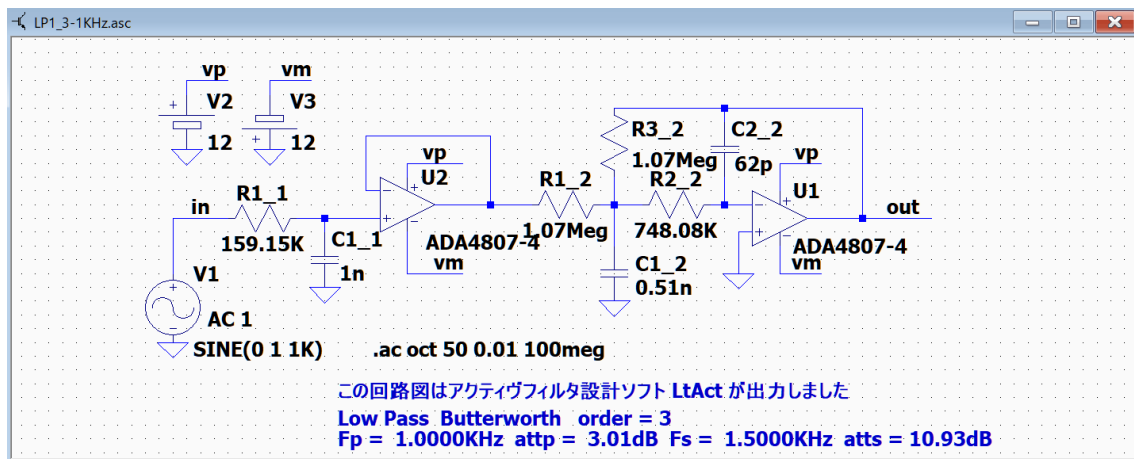
1 次のフィルタ lp1 の後に、2 次のフィルタ（LP1 または LP2）が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

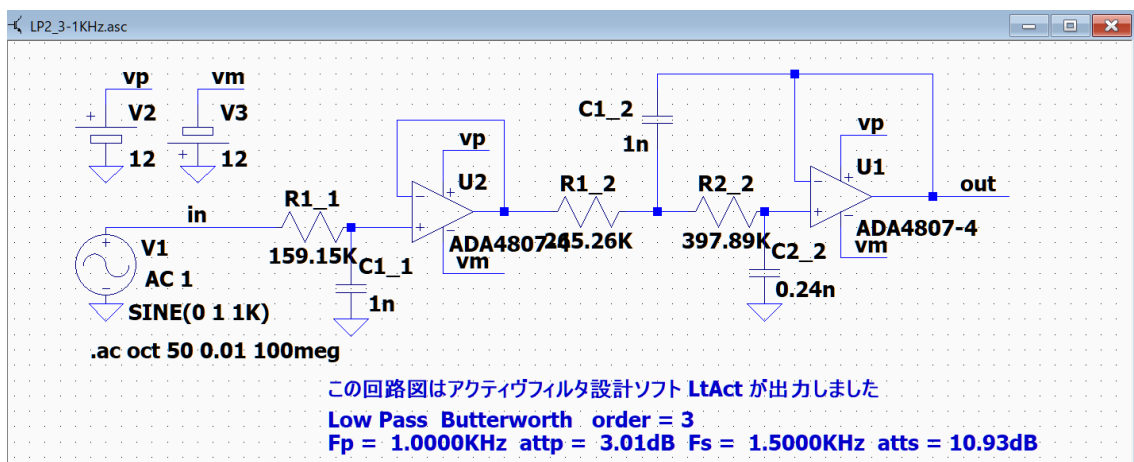
2 次のフィルタ（LP1 または LP2）が複数個使用されます。

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、

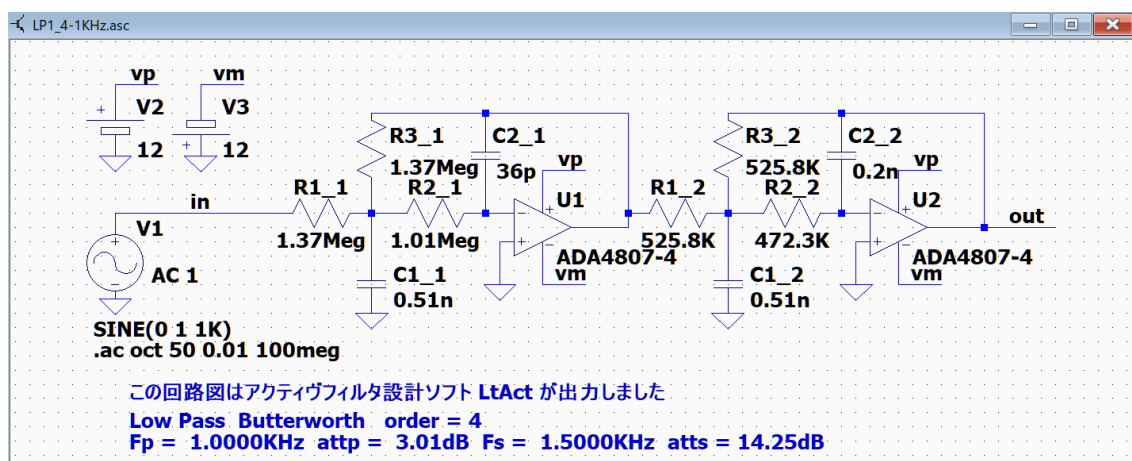
1 次のフィルタ lp1 の後に、2 次のフィルタ（LP1 または LP2）が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

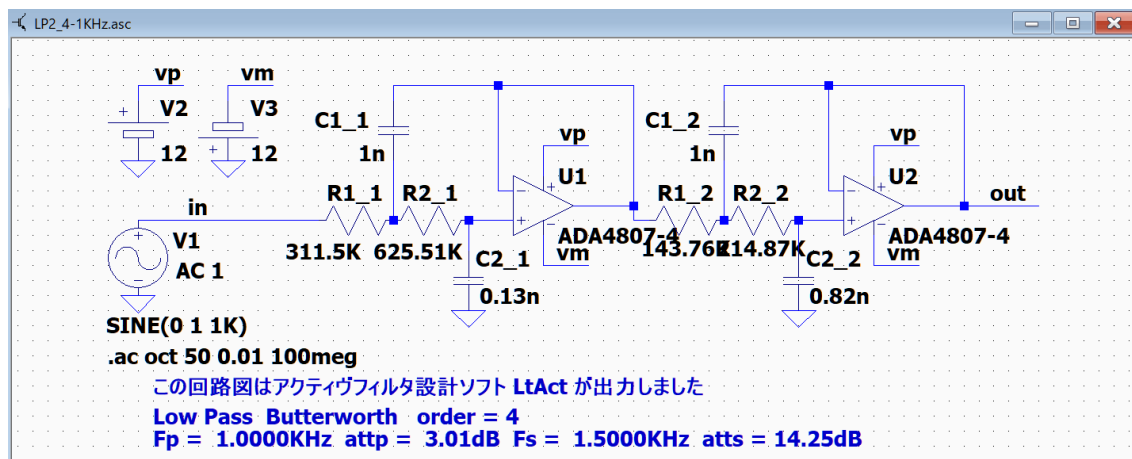
2 次のフィルタ（LP1 または LP2）が複数個使用されます。

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、

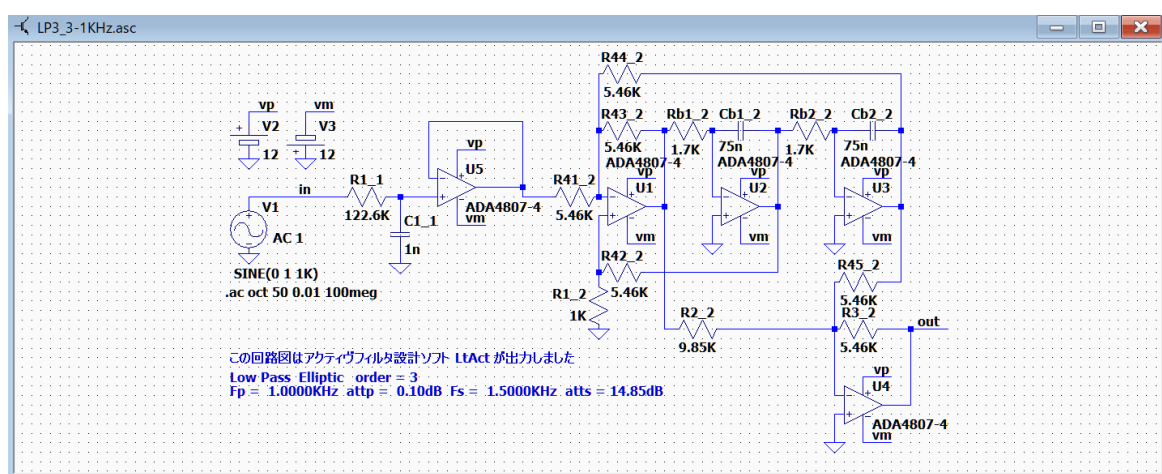
1 次のフィルタ lp1 の後に、2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

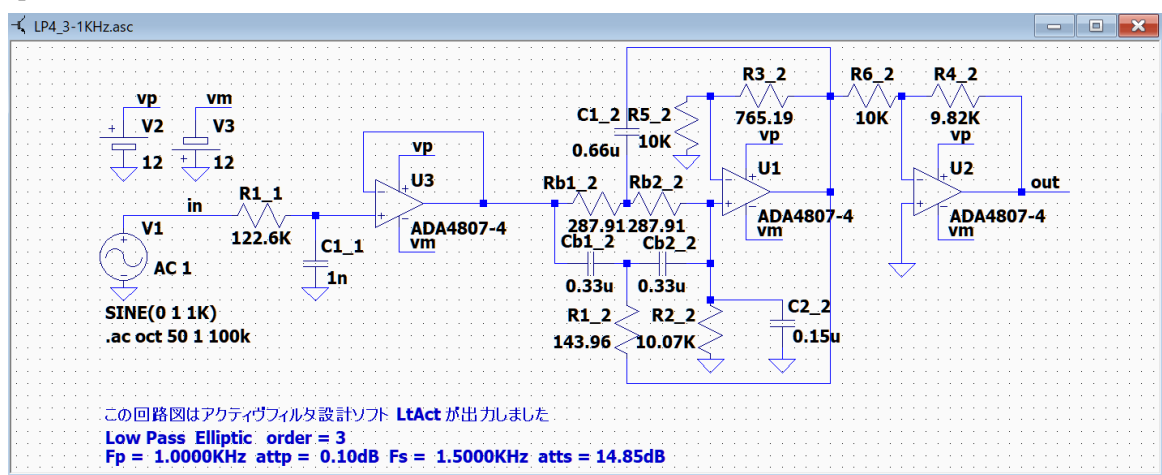
2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

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、

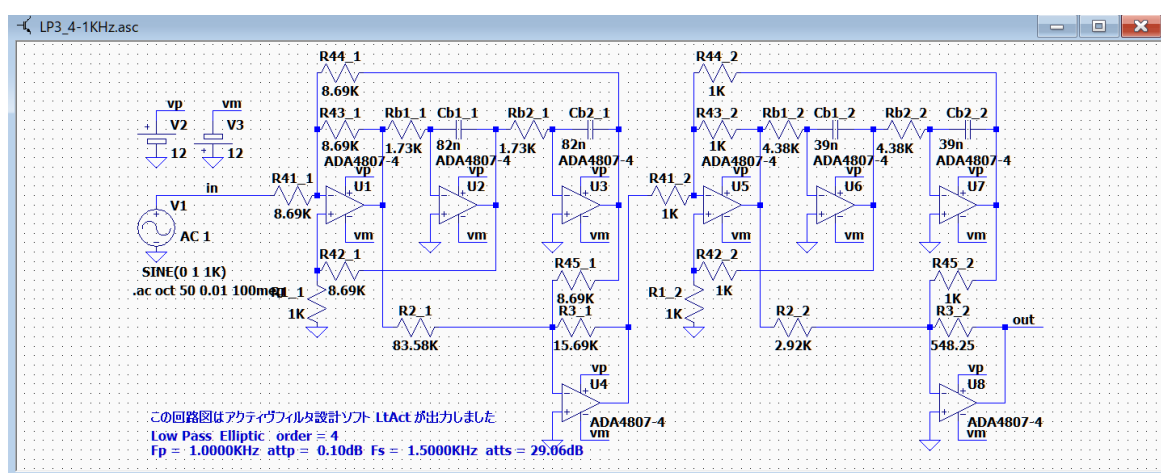
1 次のフィルタ lp1 の後に、2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

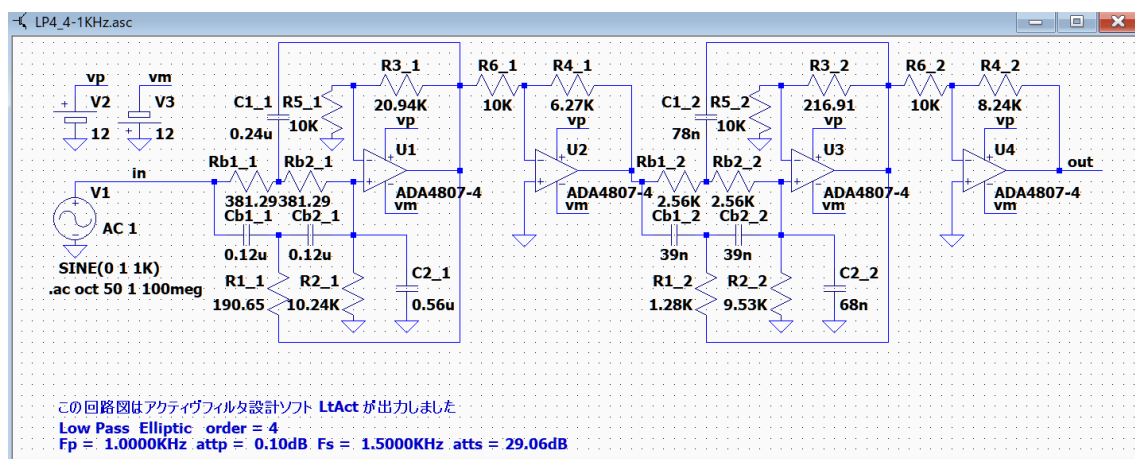
2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

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、

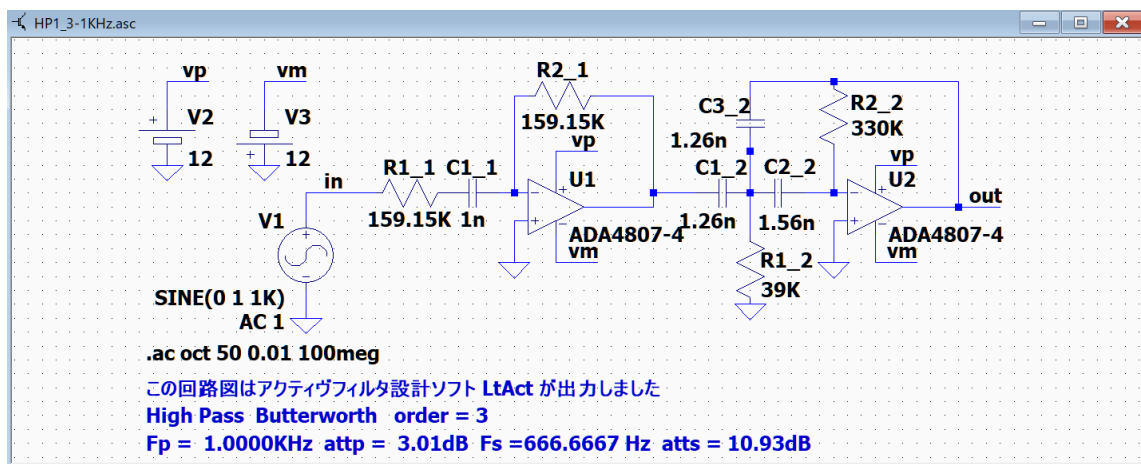
1 次のフィルタ hp1 の後に、2 次のフィルタ（HP1 または HP2）が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

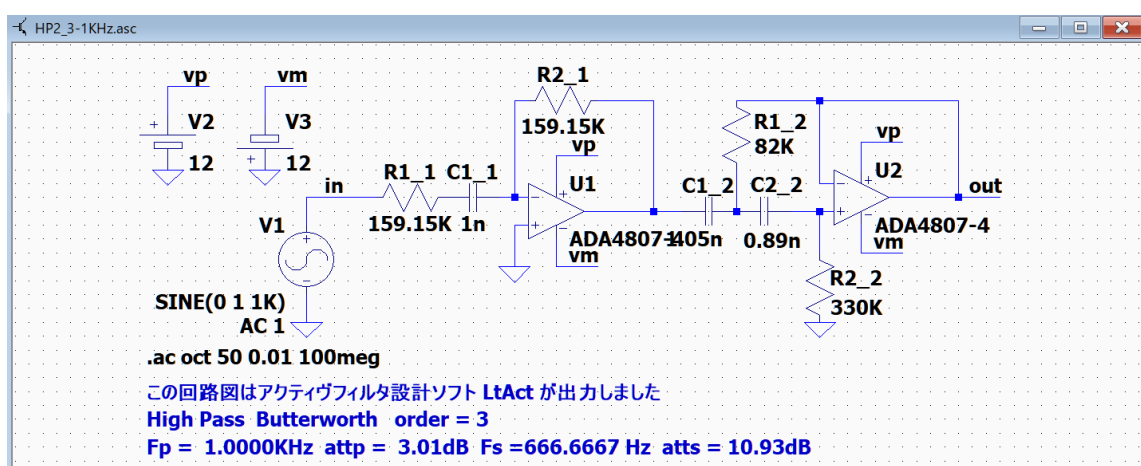
2 次のフィルタ（HP1 または HP2）が複数個使用されます。

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、

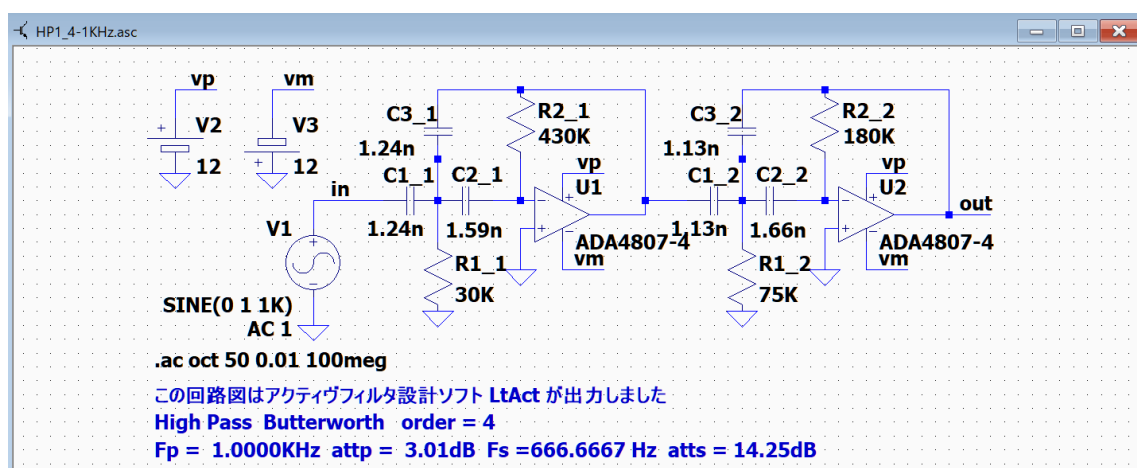
1 次のフィルタ hp1 の後に、2 次のフィルタ（HP1 または HP2）が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

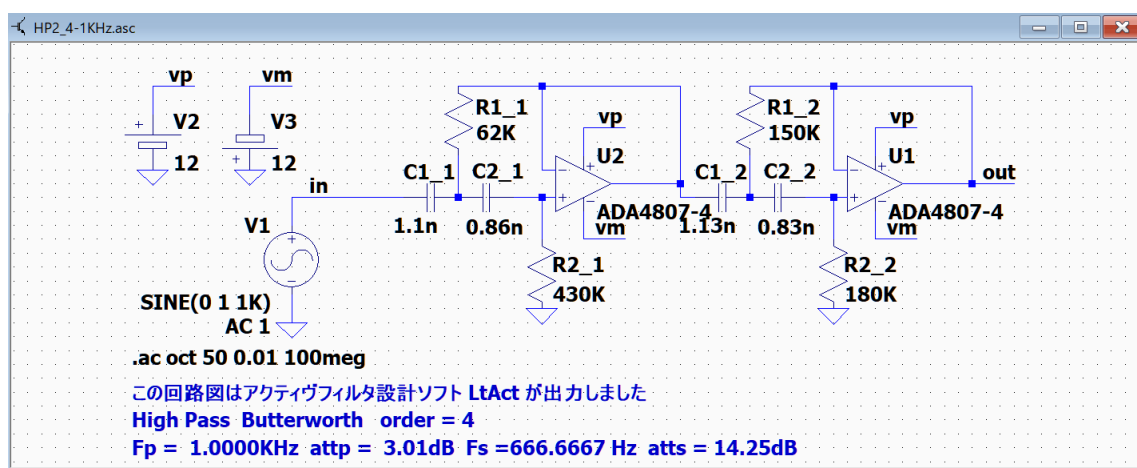
2 次のフィルタ（HP1 または HP2）が複数個使用されます。

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、

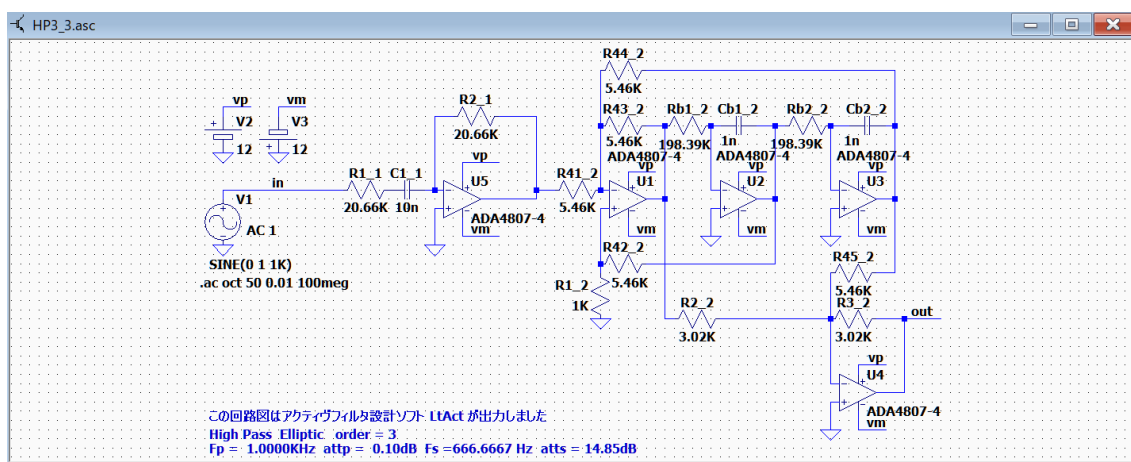
1 次のフィルタ hp1 の後に、2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

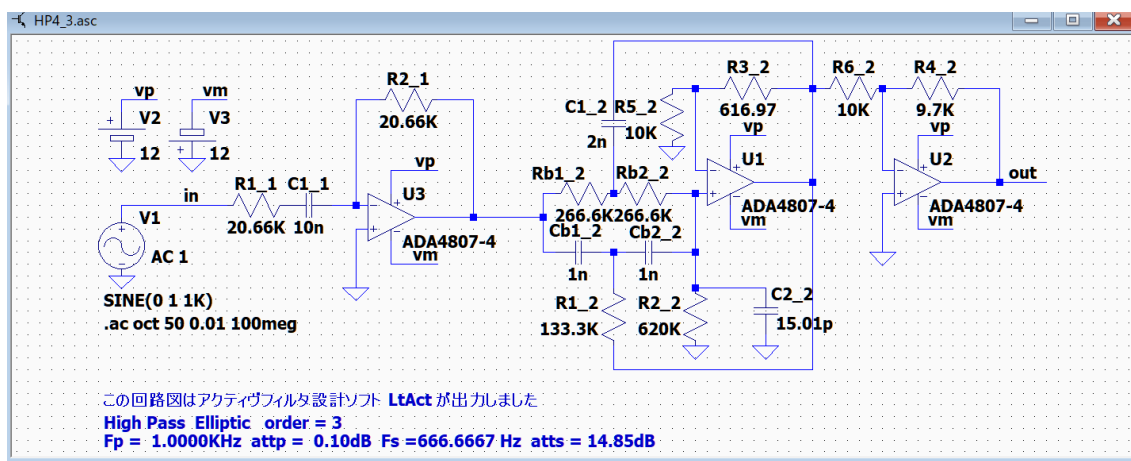
2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

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、

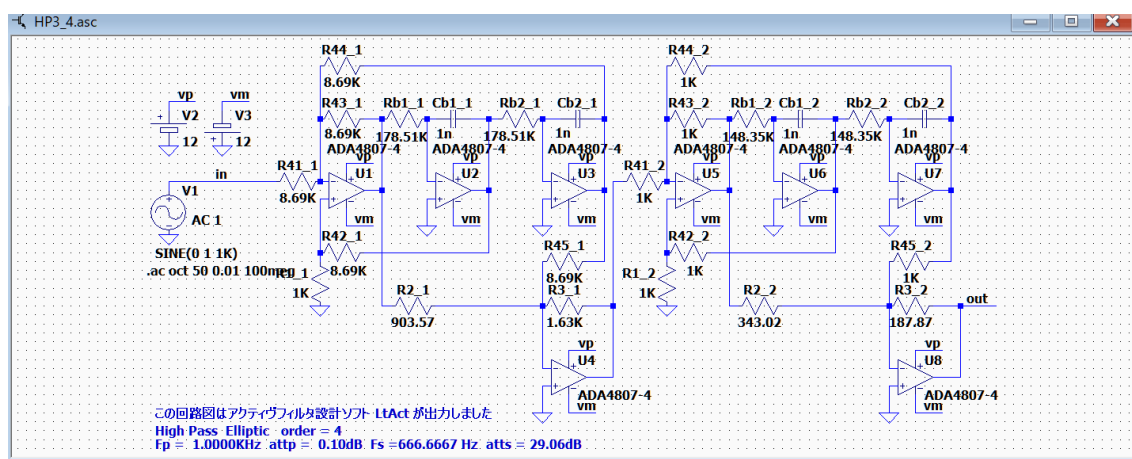
1 次のフィルタ hp1 の後に、2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

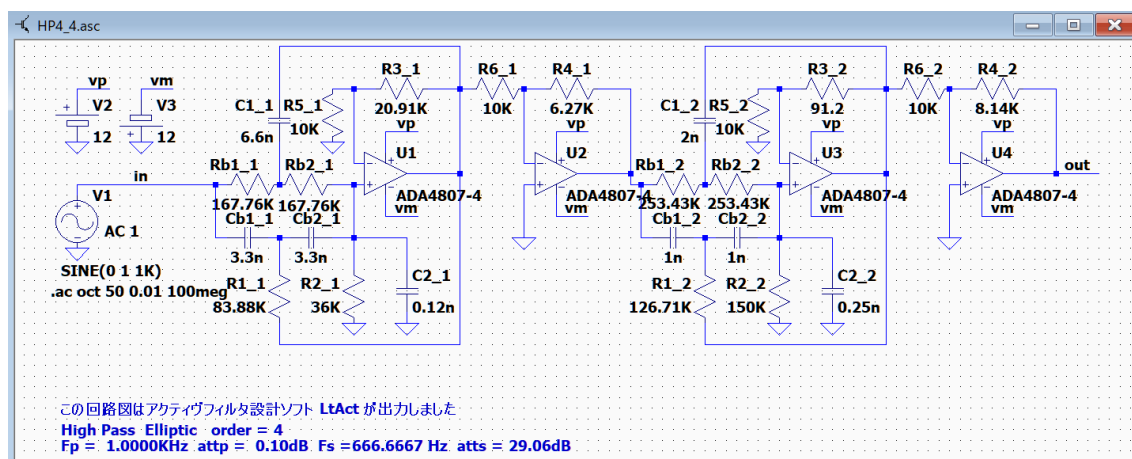
2 次のフィルタ (et1 または et2) が複数個使用されます。

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、

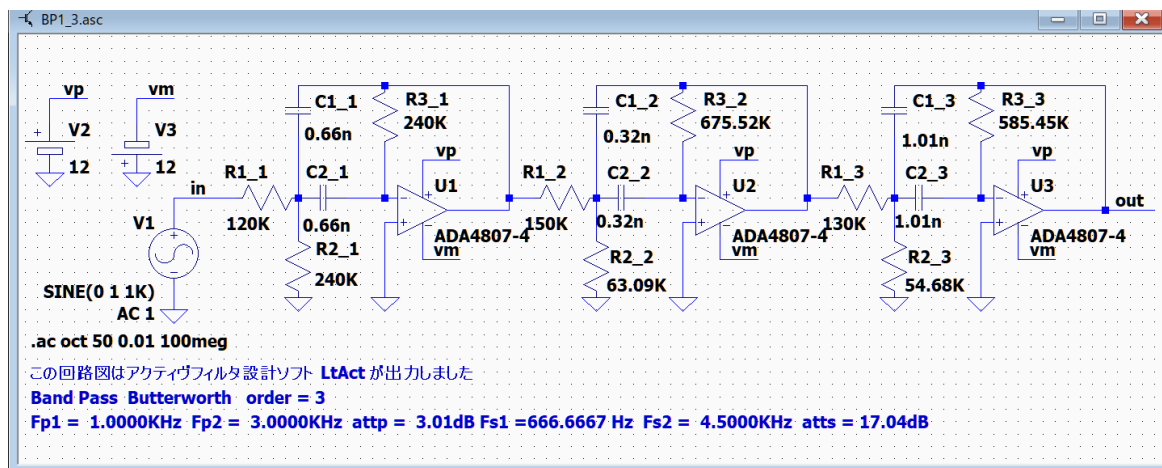
1 次のバンドパスフィルタ（BP1 または BP2）が奇数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

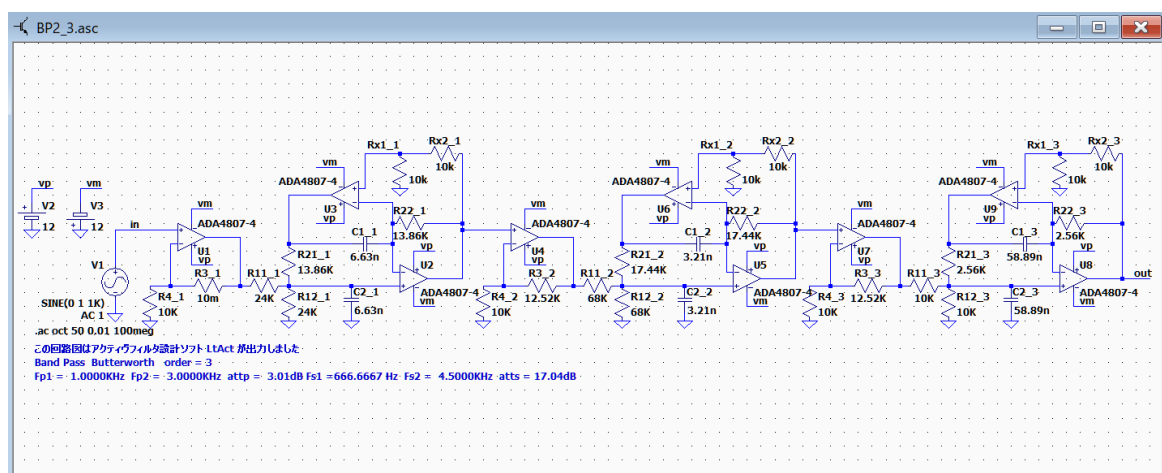
2 次のバンドパスフィルタ（BP1 または BP2）が偶数個使用されます。

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、

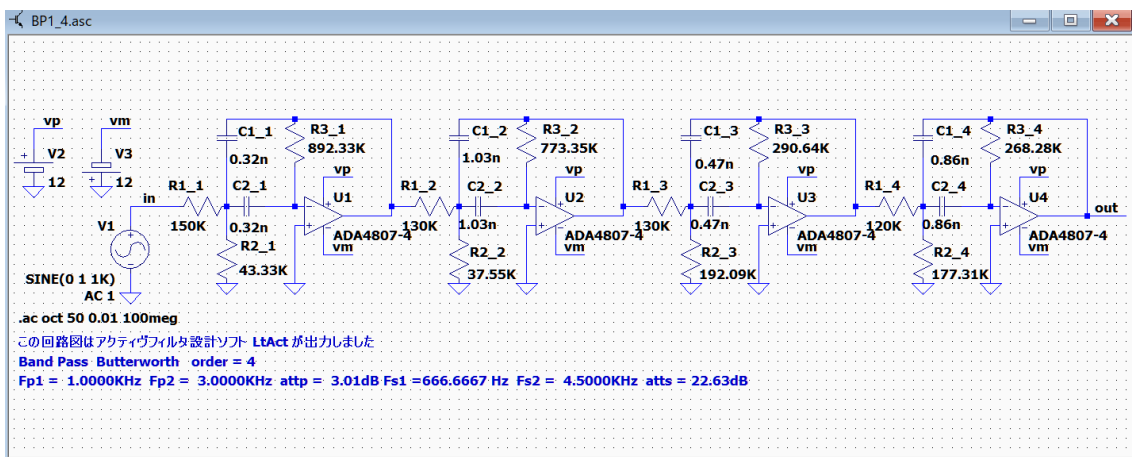
1 次のバンドパスフィルタ (BP1 または BP2) が奇数個使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

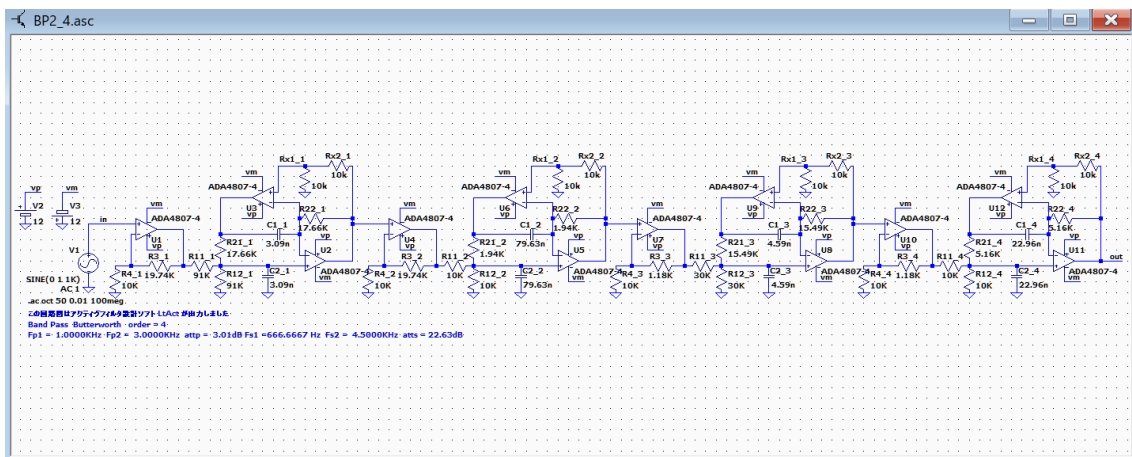
2 次のバンドパスフィルタ (BP1 または BP2) が偶数個使用されます。

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、

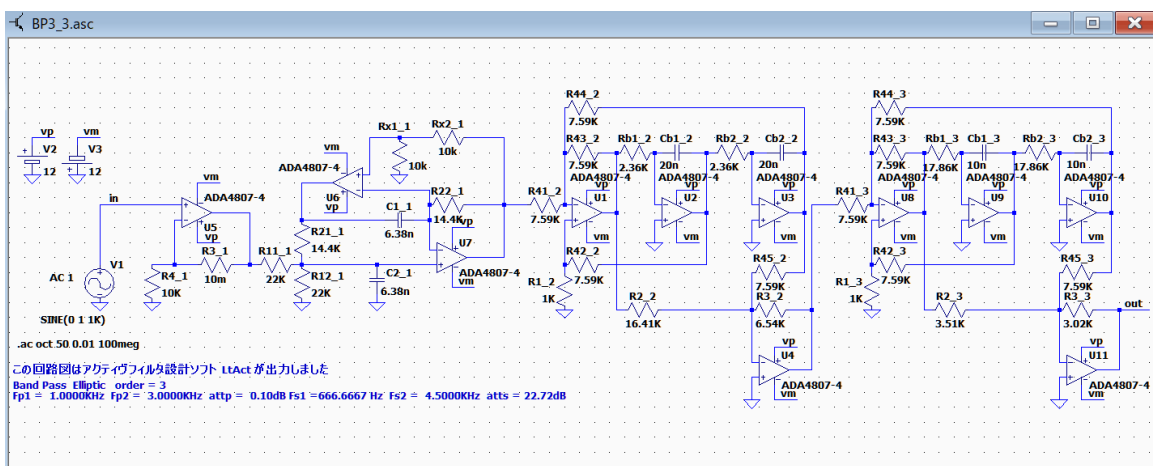
1 次のバンドパスフィルタ BP2 の後に、2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドパスフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

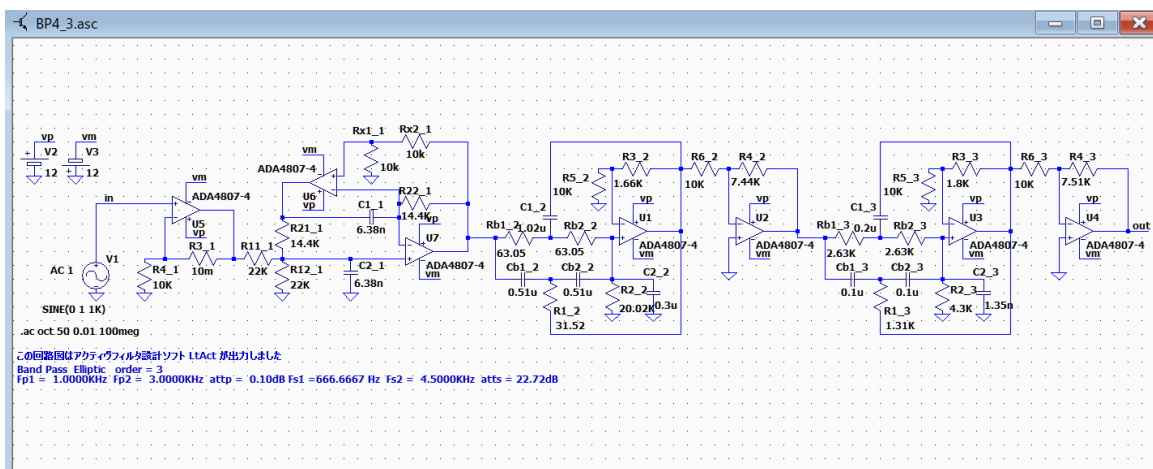
2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドパスフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

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



## フィルタの遮断特性とフィルタ特性による回路の構成

## 回路構成の例

逆チェビシエ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、

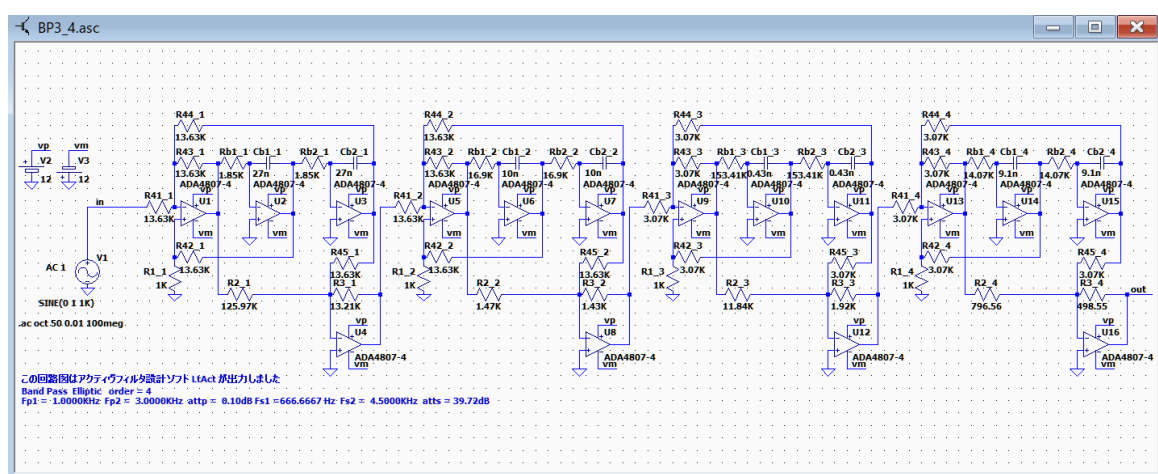
1 次バンドパスフィルタ BP2 の後に、2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドパスフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

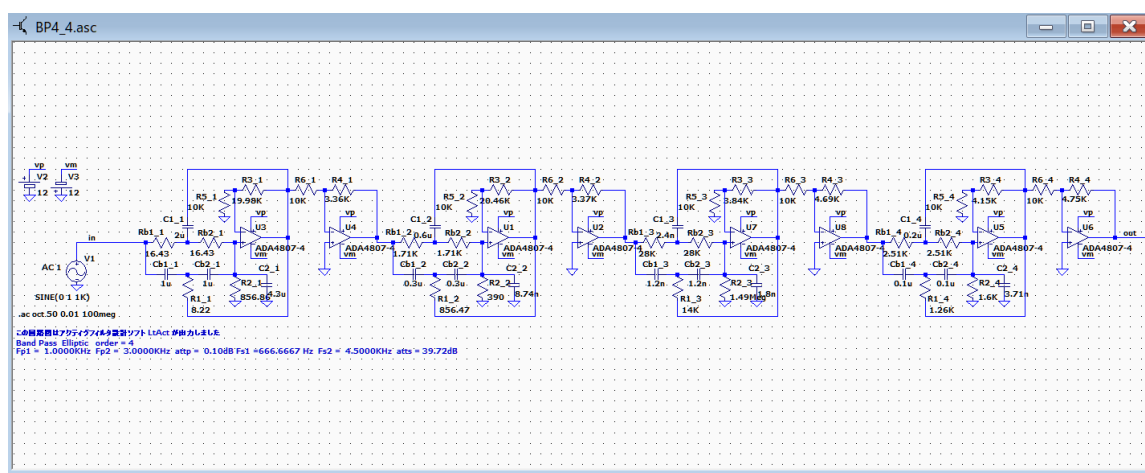
2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドパスフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

### 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、

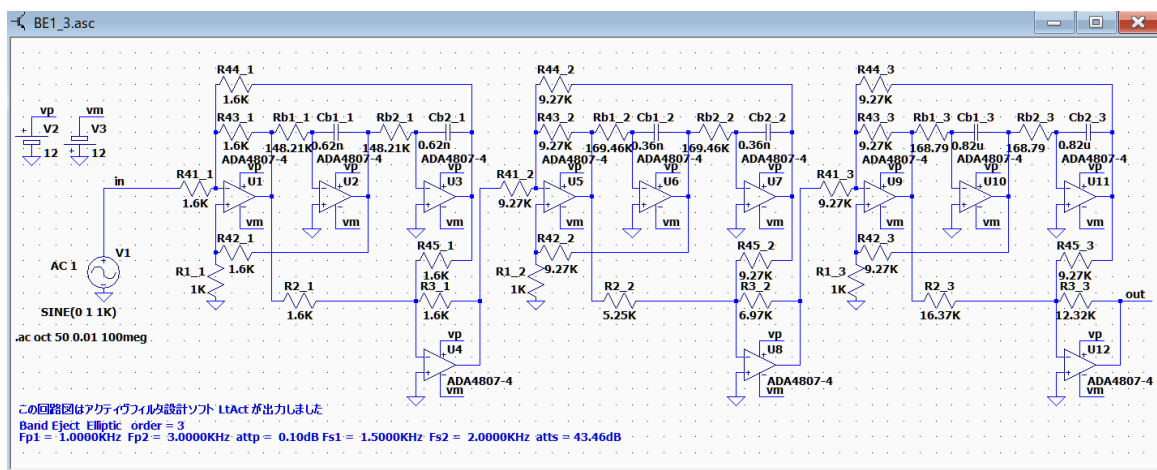
1 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) の後に、2 次のハイパスフィルタと 2 次のローパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

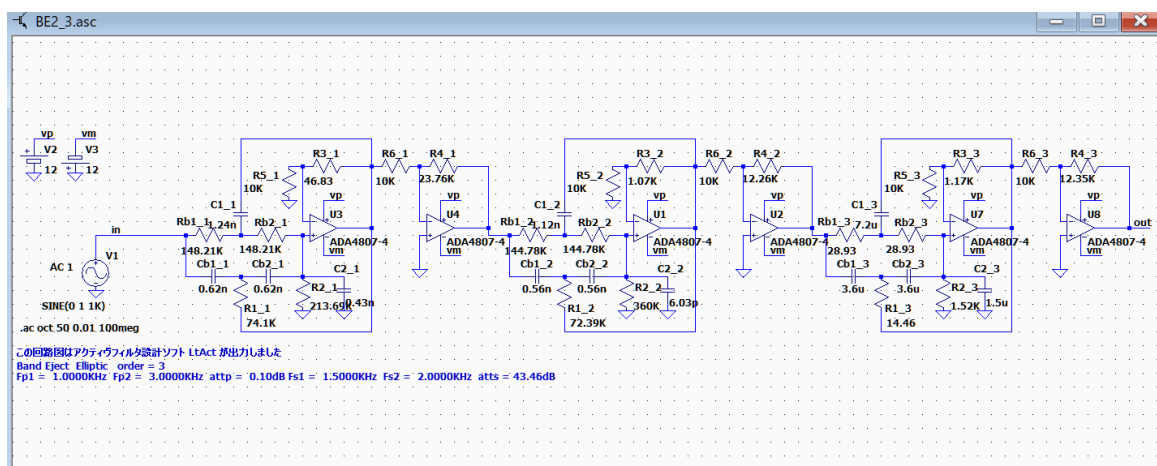
2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

### 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、

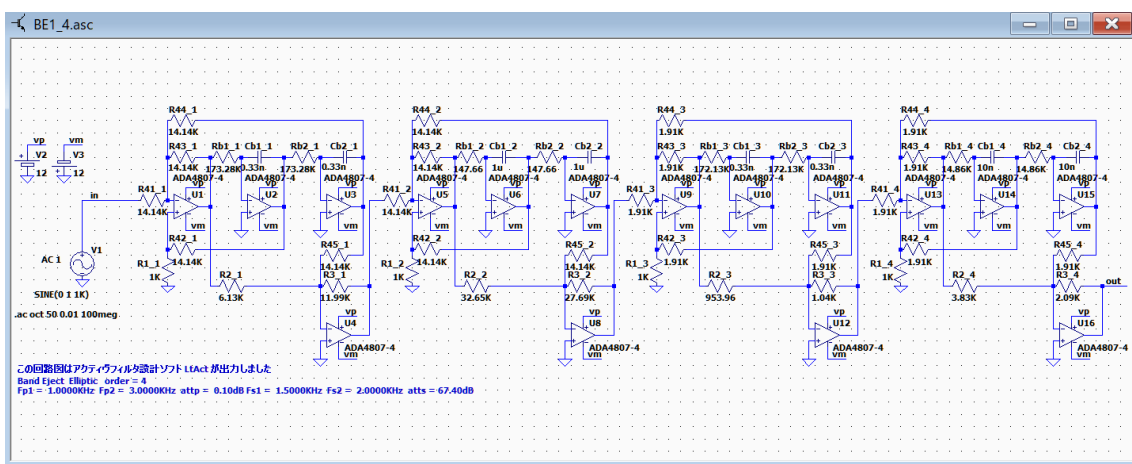
1 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) の後に、2 次のハイパスフィルタと 2 次のローパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

フィルタの次数が偶数の場合は、

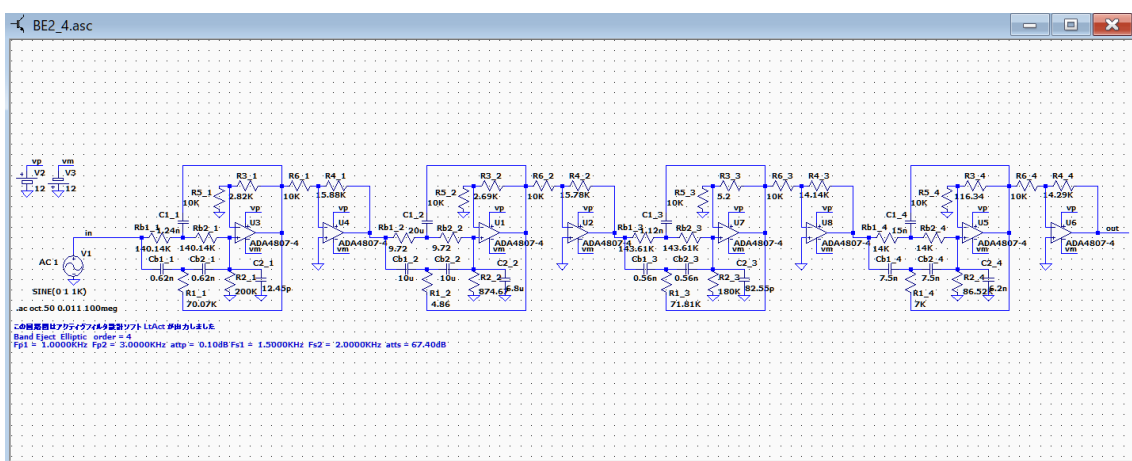
2 次のローパスフィルタと 2 次のハイパスフィルタのペアによる 2 次のバンドエリミネーションフィルタ (et1 または et2) が複数使用されます。

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

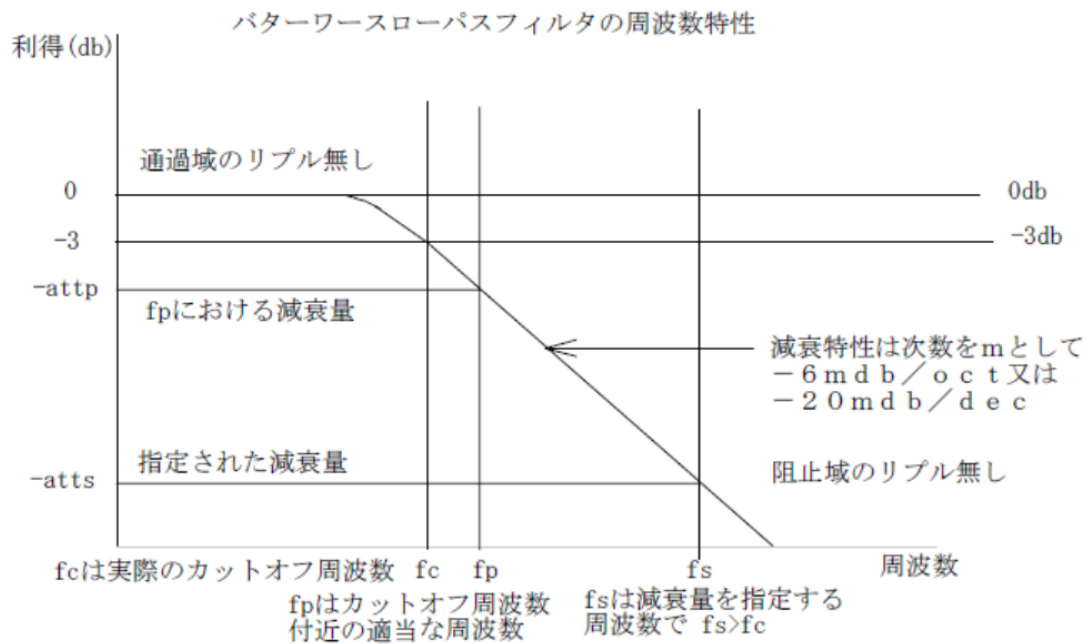


図 1 - 1 バターワースローパスフィルタの周波数特性

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

フィルタの種類	ローパスフィルタ	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 $F_p$	1	KHz	
周波数 $F_p$ における減衰量又はリプル $attp$	3.0102999566398	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	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  $attp$ 」に上で入力した  $F_p$  における減衰量  $attp$ (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  $attp$  はあらかじめ 3.01dB に設定されていますが、 $attp$  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  $attp$  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

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	バターワース
設計するフィルタの次数 $m$ ( $m \leq 58$ )	16		
カットオフ周波数 $F_c$	1	KHz	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  $F_c$  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  $attp$  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

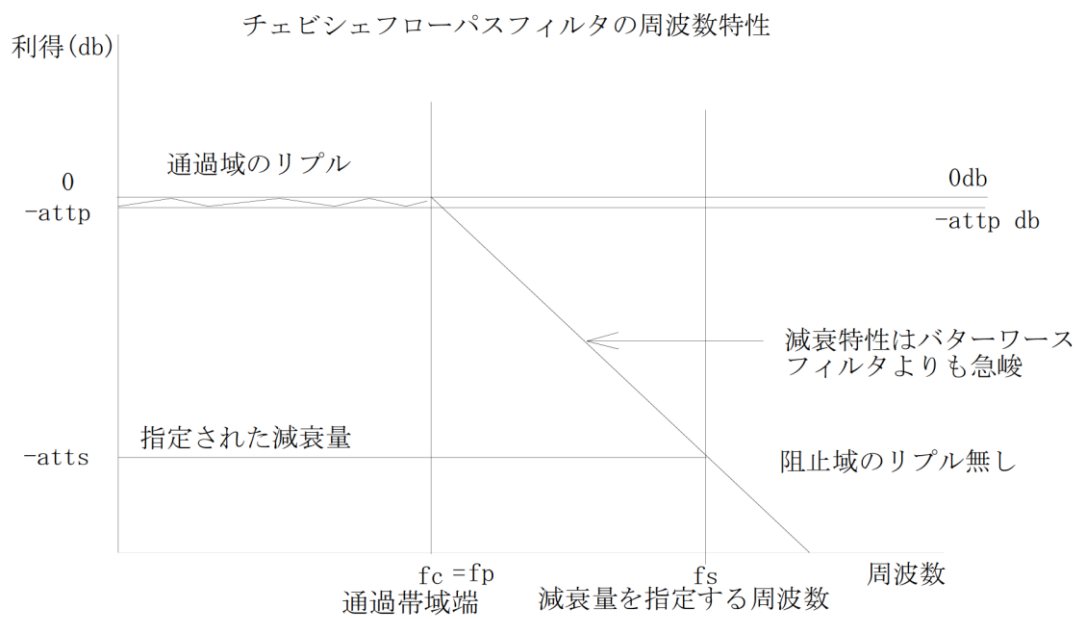


図 1－2 チェビシェフローパスフィルタの周波数特性

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    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。
- 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 $m(<=58)$	<input type="text" value="10"/>		
カットオフ周波数 $F_c$	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="KHz"/>	
周波数 $F_c$ における減衰量又はリプル $att_p$	<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text" value="dB"/>	<input type="button" value="OK"/>
最低減衰量に達する周波数を $F_s$ として、 $X_s = F_s/F_c$	<input type="text" value="1.5"/>	<input type="text" value="倍"/>	<input type="button" value="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。

逆チェビシェフローパスフィルタの場合

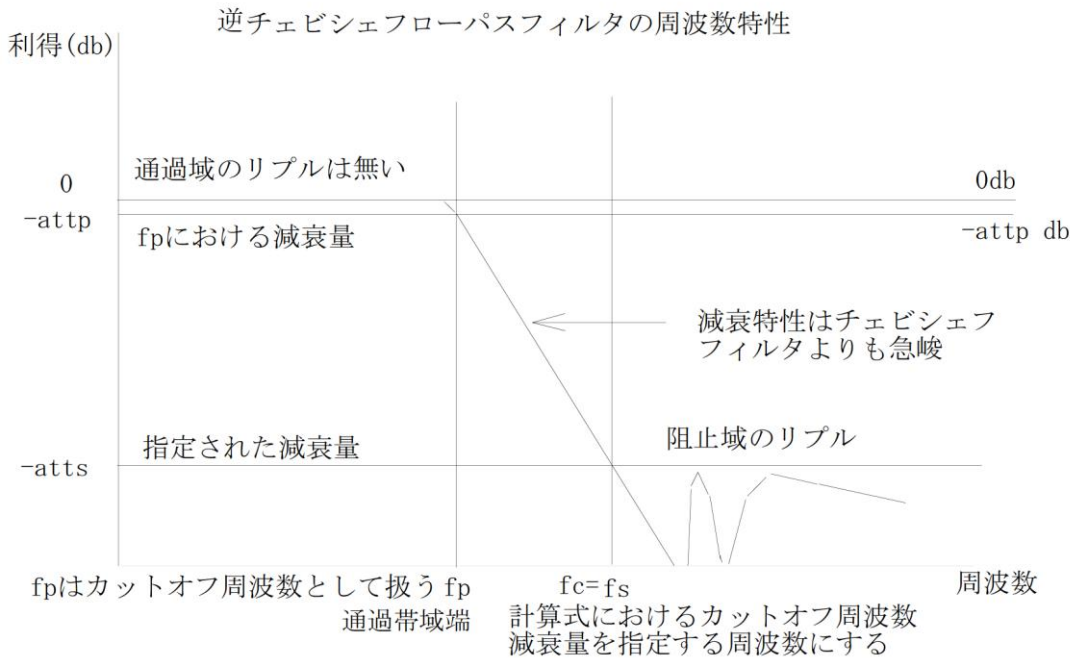


図 1－3 逆チェビシェフローパスフィルタの周波数特性

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 $F_p$	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	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。
- 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  $F_p$  における減衰量  $attp$ (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  $F_p$  の減衰量が  $attp$  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

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	
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	

「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

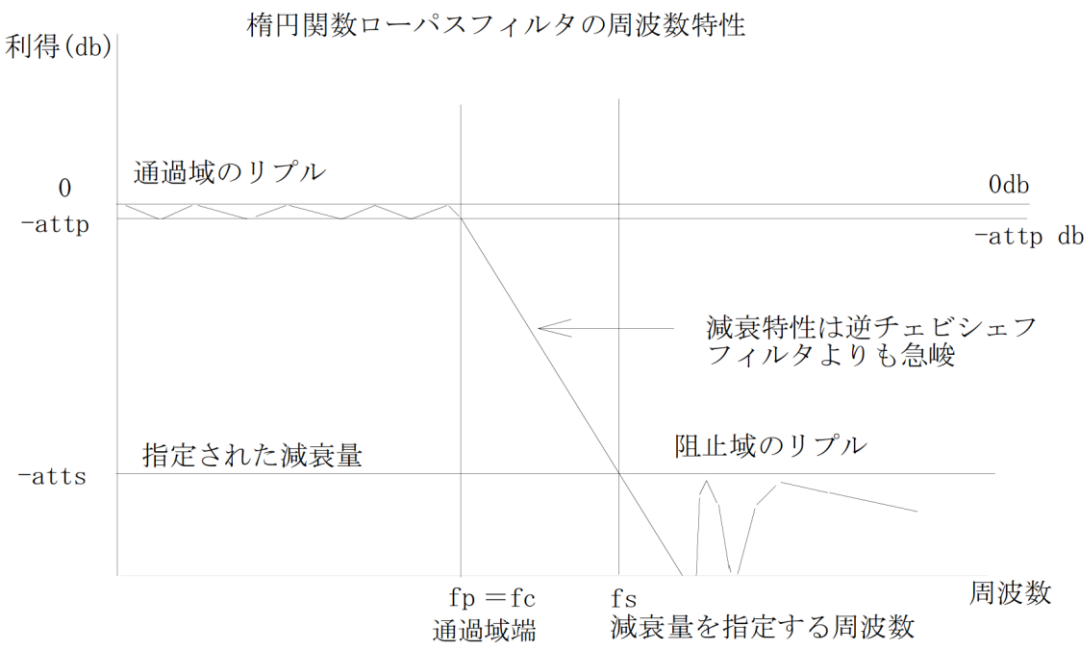


図 1－4 楕円関数ローパスフィルタの周波数特性

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"/>	<input type="text" value="0.1"/>	KHz
周波数 $F_p$ における減衰量又はリプル $attp$	<input type="text" value="1.5"/>	<input type="text" value="60"/>	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"/>	<input type="text" value="60"/>	倍
周波数 $F_s$ における減衰量 $atts$	<input type="text" value="60"/>	<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  $attp$ 」に上で入力した  $F_p$  における減衰量  $attp(dB)$  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  $F_p$  の減衰量が  $attp$  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

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 $attp$	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

「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  $attp$ 」に周波数  $F_c$  における減衰量  $attp$  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  $attp$  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。

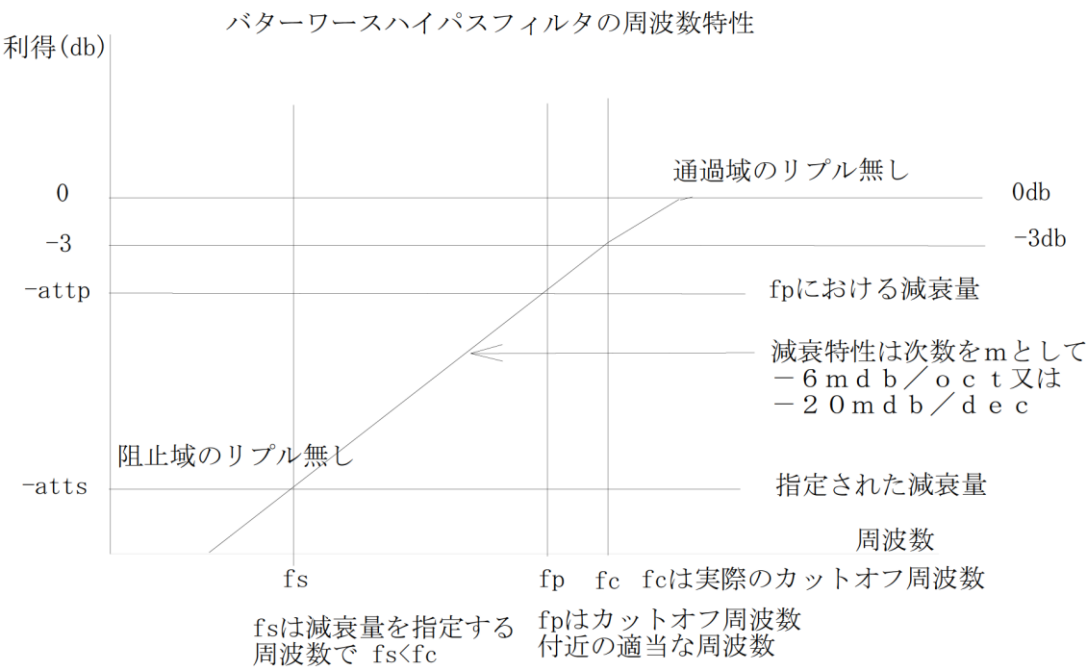


図 3 - 1 バターワースハイパスフィルタの周波数特性

ハイパスフィルタの場合には、**Fc** はカットオフ周波数で、**Fp** はカットオフ周波数付近の周波数、**Fs** は最低減衰量を指定する周波数、**Xs** は **Fc** (**Fp**) が **Fs** の何倍なのかを示す比率を表します。**Xs** の許容範囲は  $1 < Xs \leq 100$  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 $F_p$	1	KHz	
周波数 $F_p$ における減衰量又はリップル $attp$	3.0102999566398	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  $attp$ 」に上で入力した  $F_p$  における減衰量  $attp$ (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 $m$ ( $m \leq 58$ )	1		
カットオフ周波数 $F_c$	1	KHz	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  $F_c$  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 $attp$	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  $attp$ 」に上で入力した  $F_p$  におけるリップル  $attp$ (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 ( $F_p / F_s$ ) 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 $attp$	0.1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を $F_s$ として、 $X_s =$	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  $attp$ 」に周波数  $F_c$  におけるリップル  $attp$  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ップル $attp$	0.1	dB	
減衰量を指定する周波数を $F_s$ として、 $X_s = F_p/F_s$	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  $attp$ 」に上で入力した  $F_p$  における減衰量  $attp$ (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 ( $F_p / F_s$ ) 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 $m$ ( $m \leq 58$ )	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ップル $attp$	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  $attp$ 」に周波数  $F_c$  における減衰量  $attp$  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  $attp$  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  $attp$ 」に上で入力した  $F_p$  における減衰量  $attp$ (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 ( $F_p / F_s$ ) 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  $m$  ( $m \leq 58$ ) 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ップル  $attp$  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  $attp$ 」に周波数  $F_c$  における減衰量  $attp$  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

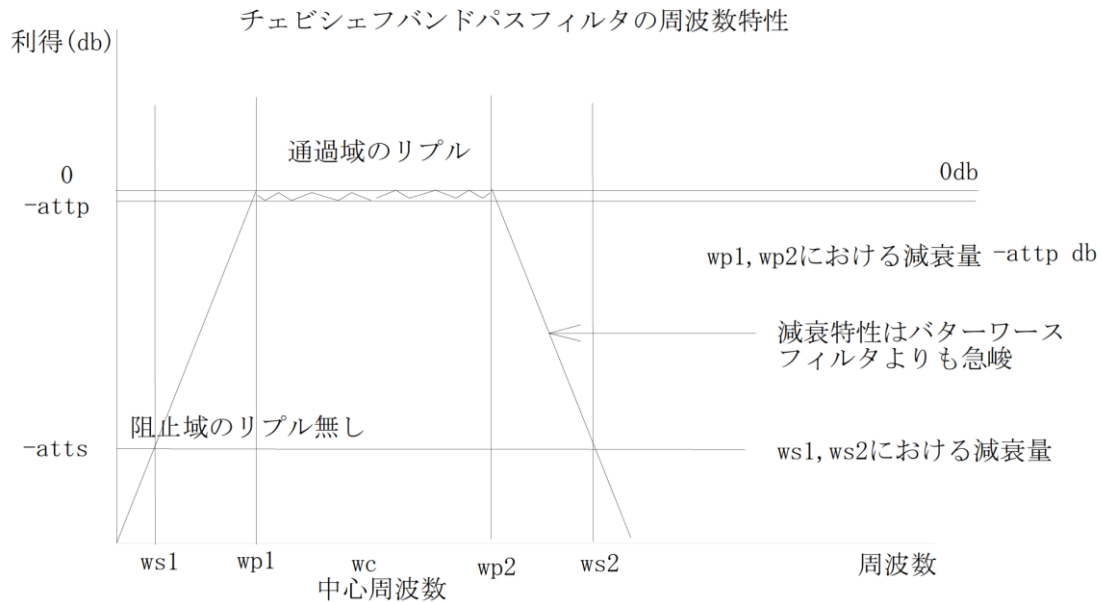


図 5 - 2 チェビシェフバンドパスフィルタの周波数特性

バンドパスフィルタでは通過域の周波数が、通過域下端  $Fp1$  と通過域上端  $Fp2$  の 2 つになります。

最低減衰量を指定する周波数も  $Fs1$  と  $Fs2$  の 2 つになりますが、指定するのは  $Fs1$  が  $Fp1$  の何分の 1 なのかを表す倍率  $Xs$  になります。 $Xs$  の許容範囲は  $1 < Xs \leq 100$  です。

従って、 $Fs1 = Fp1 / Xs$ 、 $Fs2 = Fp2 \cdot Xs$  の関係になります。

リプルは  $Fp1$  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  $F_{p2}$  : ( $F_{s2} = F_{p2} \cdot x_s$ ) 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  $m$  ( $m \leq 58$ ) 1

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  $F_{p2}$  : ( $F_{s2} = F_{p2} \cdot x_s$ ) 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ップル $attp$	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	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。
- 「3 行目  $attp$ 」に周波数  $F_{p1}$  のリップルを入力する。
- 「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 $m$ ( $m \leq 58$ )	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ップル $attp$	0.1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を $F_{s1}$ として, $x_s = F_{p1}/F_{s1}$	1.5	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  $F_{p1}$ 」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  $F_{p1}$  のリップルを入力する。
- 「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。

チェビシェフ、逆チェビシェフ、楕円関数を設計する時

バンドエリミネーションフィルタ

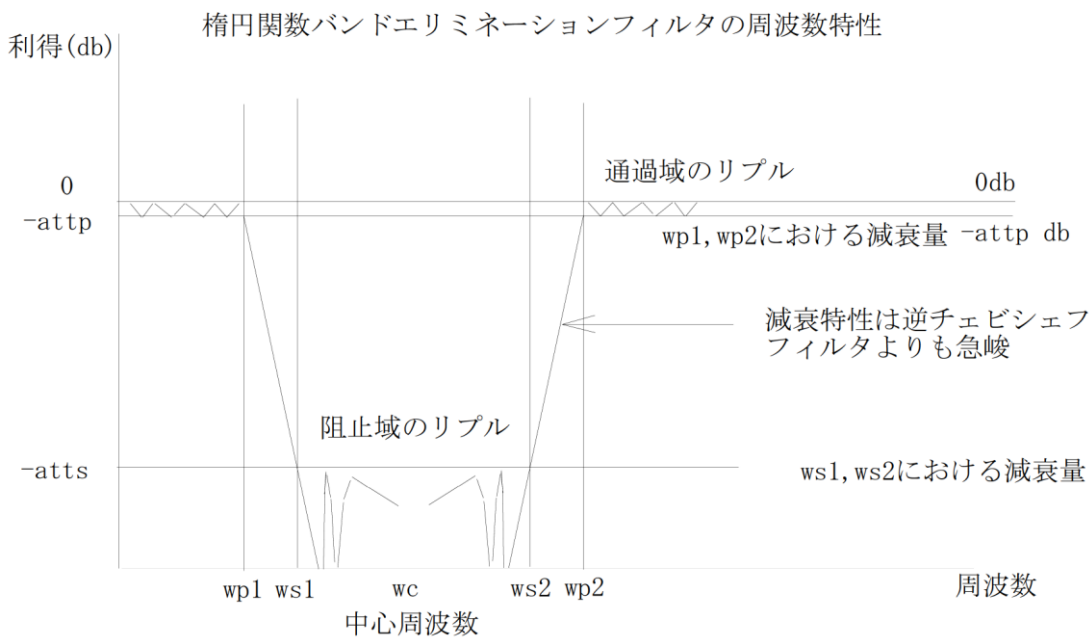


図 7 - 4 楕円関数B Eフィルタの周波数特性

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	BEフィルタ	遮断特性	バターワース
阻止帯域 下端の周波数 $F_{p1}$ : ( $F_{s1} = F_{p1} \times x_s$ )	1	KHz	
阻止帯域 上端の周波数 $F_{p2}$ : ( $F_{s2} = F_{p2} / x_s$ )	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、 $x_s = F_{s1} / F_{p1}$ を次の範囲で			
入力して下さい $1 < x_s <$	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  $F_{p1}$ 」に阻止域の下端周波数  $F_{p1}$  を入力する。

「2 行目  $F_{p2}$ 」に阻止域の上端周波数  $F_{p2}$  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 ( $F_{s1} / F_{p1}$ ) 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	BE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 $m$ ( $m \leq 58$ )	3		
阻止帯域 下端の周波数 $F_{p1}$ : ( $F_{s1} = F_{p1} \times x_s$ )	1	KHz	
阻止帯域 上端の周波数 $F_{p2}$ : ( $F_{s2} = F_{p2} / x_s$ )	3	KHz	
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 $1 < x_s < 1.7321$	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  $F_{p1}$ 」に阻止域の下端周波数  $F_{p1}$  を入力する。

「3 行目  $F_{p2}$ 」に阻止域の上端周波数  $F_{p2}$  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 ( $F_{s1} / F_{p1}$ ) を入力する。

$x_s$  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

設計パラメータの入力

フィルタの種類 BEフィルタ

遮断特性 Chebyshev

阻止帯域 下端の周波数  $F_{p1}$  : ( $F_{s1} = F_{p1} * X_s$ ) 1 KHz

阻止帯域 上端の周波数  $F_{p2}$  : ( $F_{s2} = F_{p2} / X_s$ ) 3 KHz

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

減衰量を指定する周波数を  $F_{s1}$  として,  $X_s = F_{s1} / F_{p1}$  を次の範囲で

入力して下さい  $1 < X_s < 1.7321$  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  $F_{p1}$ 」に阻止域の下端周波数  $F_{p1}$  を入力する。
- 「2 行目  $F_{p2}$ 」に阻止域の上端周波数  $F_{p2}$  を入力する。
- 「3 行目  $attp$ 」に周波数  $F_{p1}$  のリップル  $attp$  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 ( $F_{s1} / F_{p1}$ ) を入力する。  
 $X_s$  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  $F_{s1}$  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 BE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  $m$  ( $m \leq 58$ ) 18

阻止帯域 下端の周波数  $F_{p1}$  : ( $F_{s1} = F_{p1} * X_s$ ) 1 KHz

阻止帯域 上端の周波数  $F_{p2}$  : ( $F_{s2} = F_{p2} / X_s$ ) 3 KHz

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

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

入力して下さい  $1 < X_s < 1.7321$  1.5 倍 OK

キャンセル

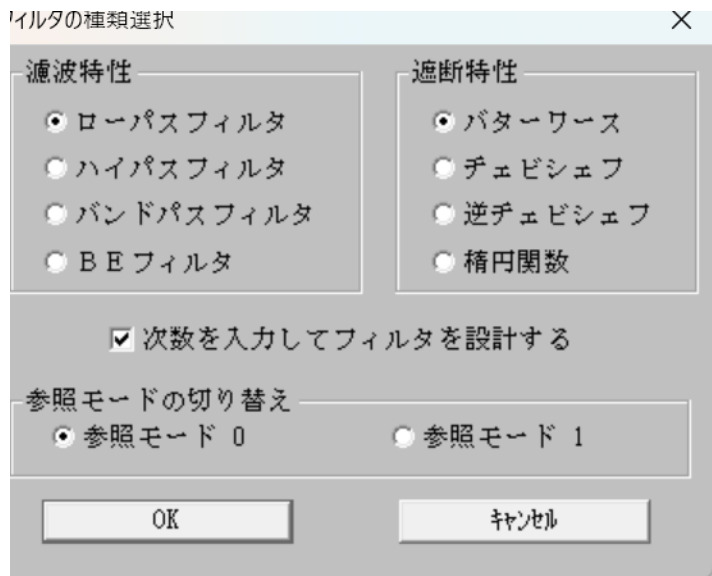
- 「1 行目  $m$ 」にフィルタの次数  $m$  を入力する。
- 「2 行目  $F_{p1}$ 」に阻止域の下端周波数  $F_{p1}$  を入力する。
- 「3 行目  $F_{p2}$ 」に阻止域の上端周波数  $F_{p2}$  を入力する。
- 「4 行目  $attp$ 」に周波数  $F_{p1}$  のリップル  $attp$  を入力する。
- 「5 行目  $X_s$ 」に最低減衰量を指定する周波数  $F_{s1}$  と  $F_{p1}$  の比 ( $F_{s1} / F_{p1}$ ) を入力する。  
 $X_s$  の上限は入力 Box の左側に表示されている数値 (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

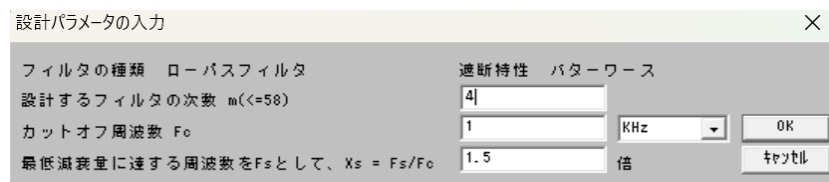
## LtAct によるフィルターの設計手順

## 設計 1 バターワース・ローパスフィルタ

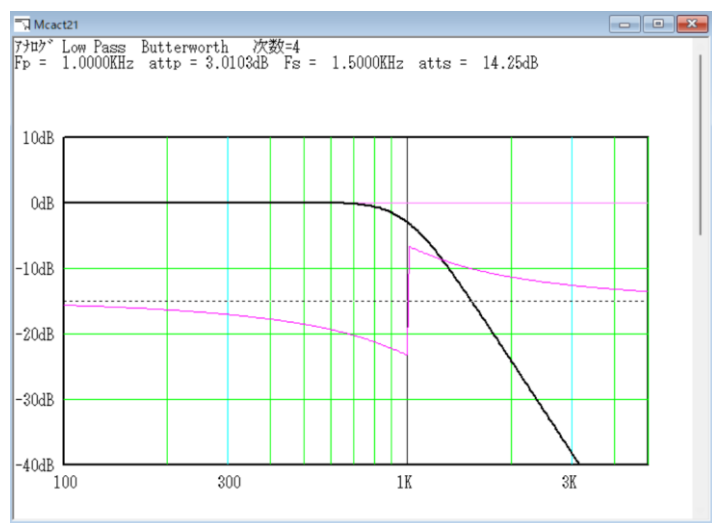
1. 最初に、設計するフィルタの種類を決定する。



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。

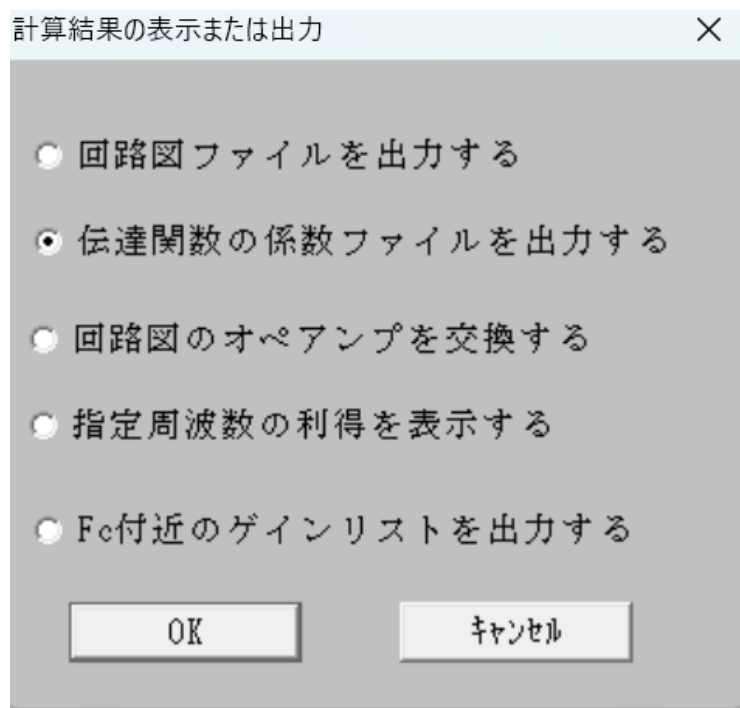


3. これで、設計が出来ました。周波数特性のグラフが表示されます。

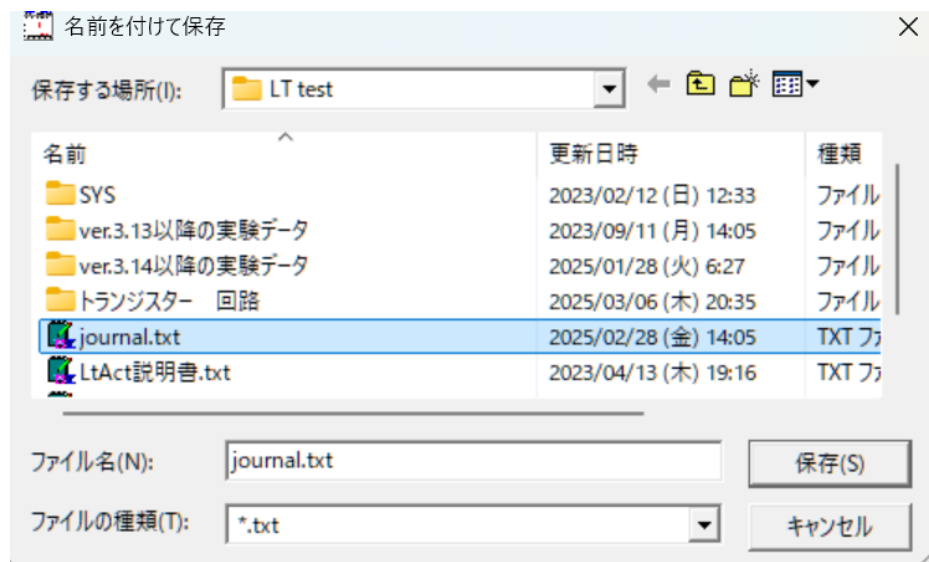


1. 最初に、設計するフィルタの種類を決定する。

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

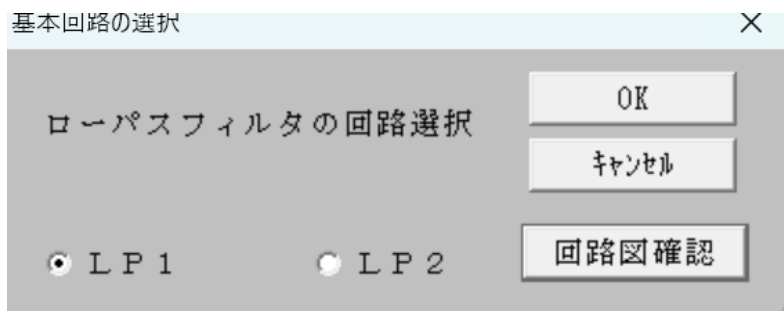
$$H_2 = \frac{39.4784\text{Meg}}{s^2 + 11.6098\text{K} \cdot s + 39.4784\text{Meg}}$$

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。

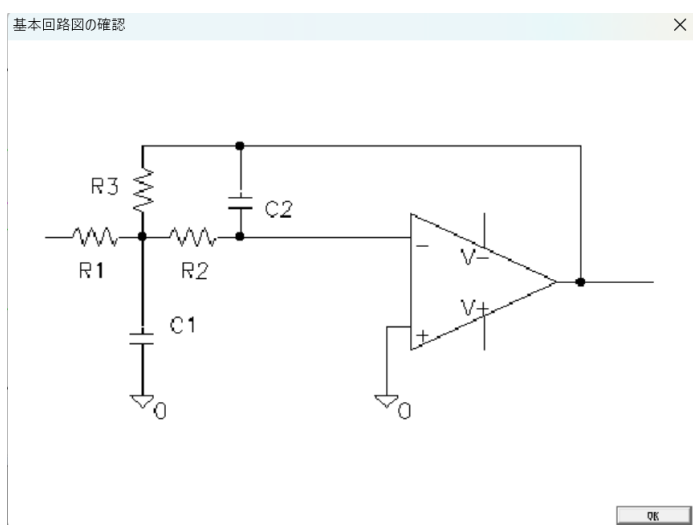
2 番目のカットオフ周波数におけるゲインと Q 値はそれぞれ、Fc ゲイン= - 5.3329 dB Q = 0.5412、オペアンプに要求される GB 積は 54.1196KHz 以上である。

## 7. 回路図のファイルを出力する。

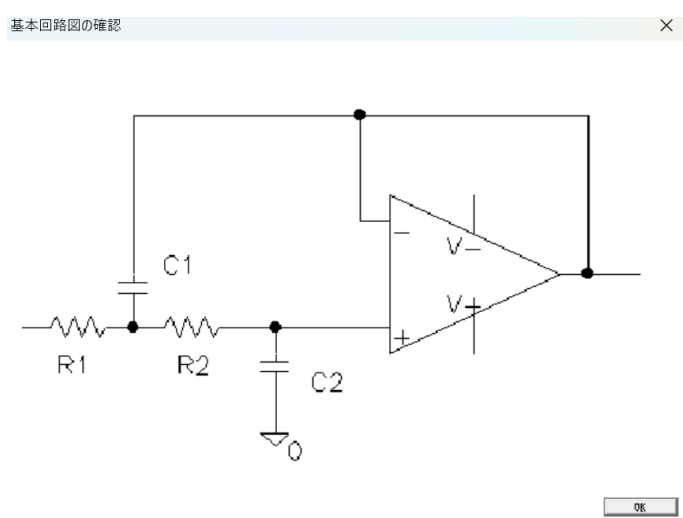


基本回路を選択して「OK」を押す。今回は、「LP1」または「LP2」が選択できる。

## 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的设计です。

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-の伝達関数

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

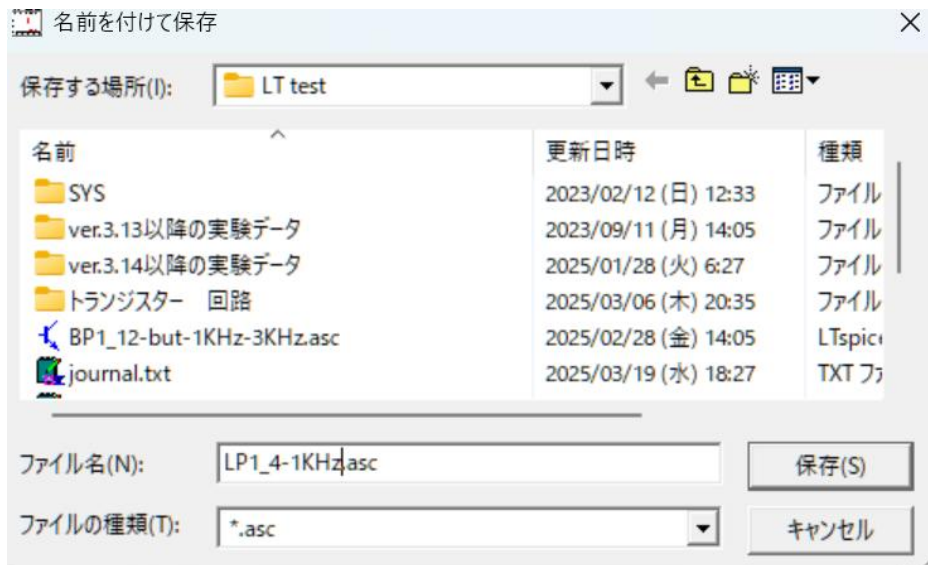
2 番目のフィルタ-の伝達関数

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

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。

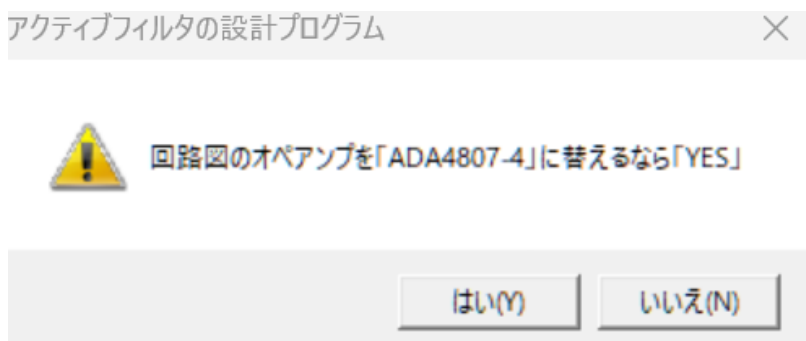
このフィルタ-の合成は、「フィルタごとの伝達関数と素子値の決定方法」→「ローパスフィルタ」→「バターワースとチェビシェフの決定方法」に説明してあります。

## 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。

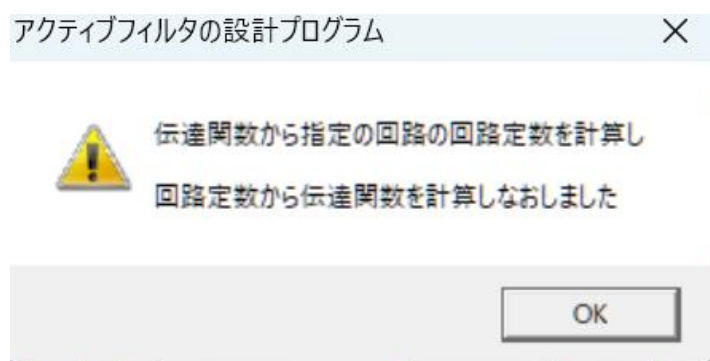


コンデンサと抵抗の推奨値が表示される。「OK」を押せば次の素子の決定に移る。  
ここでは「OK」を押す。

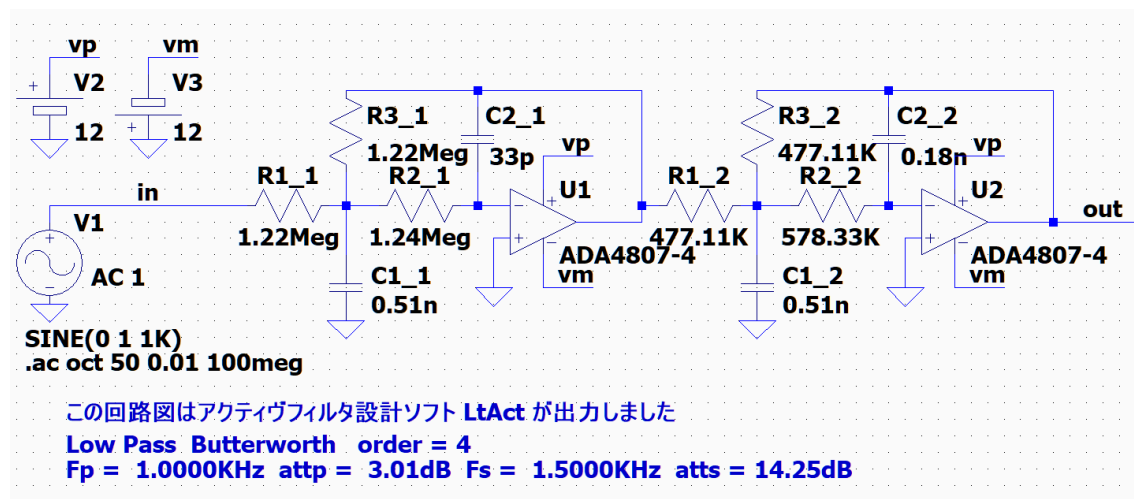
1 1. 2 番目の素子値も同様に「OK」を押す。



1 2. 回路図が完成した。

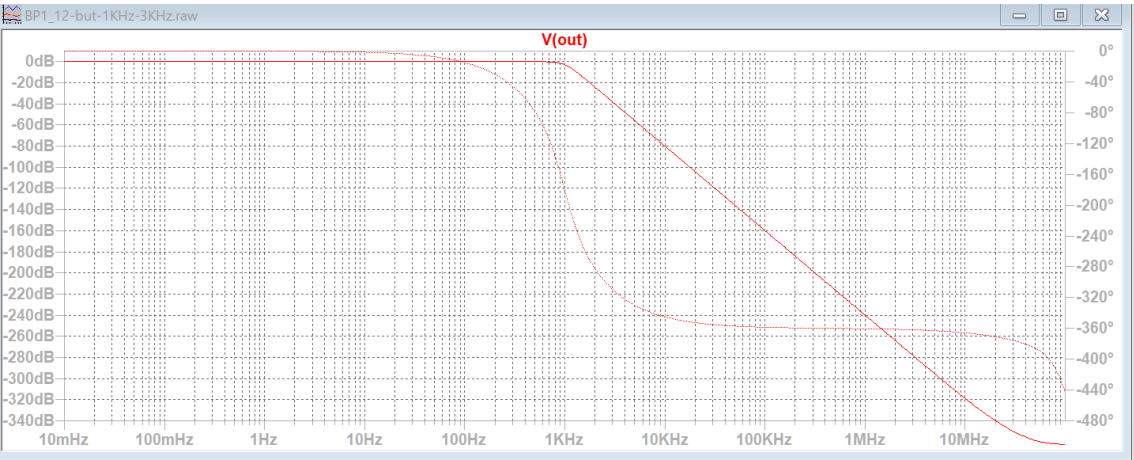


1 3. 「LTSpice」で回路図ファイル「LP1\_4-1KHz.asc」を開く。

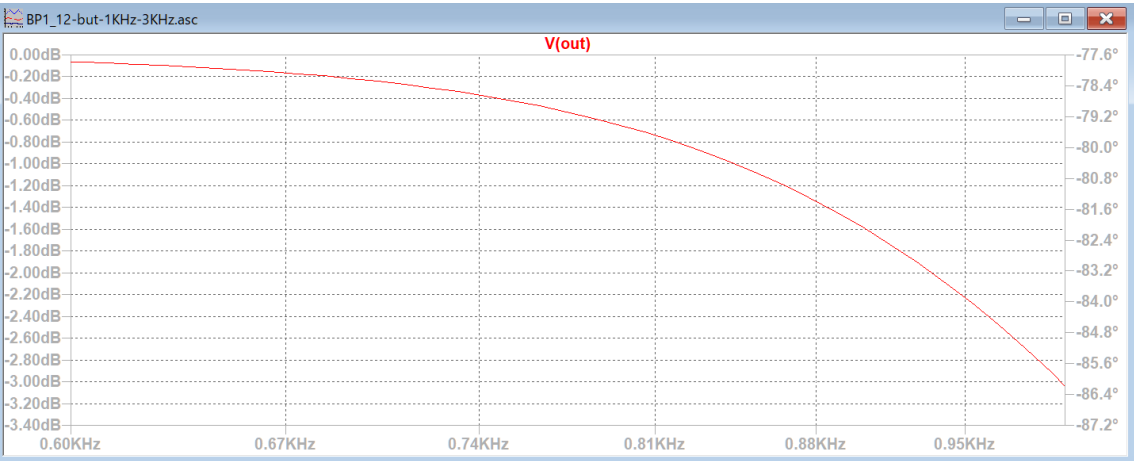


1 1. 2 番目の素子値も同様に「OK」を押す。

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:\LT test\BP1\_12-but-1KHz-3KHz.asc 作成日時 Wed Mar 19 19:03:19 2025

フィルタ 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 = 0.5100n C2\_1 = 33.0000p  
R1\_1 = R3\_1 = 1.2162Meg R2\_1 = 1.2376Meg 誤差 = 3.31 %  
2 (LP1) 「LP1-0-2」 C1\_2 = 0.5100n C2\_2 = 0.1800n  
R1\_2 = R3\_2 = 477.1108K R2\_2 = 578.3334K 誤差 = 3.50 %

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

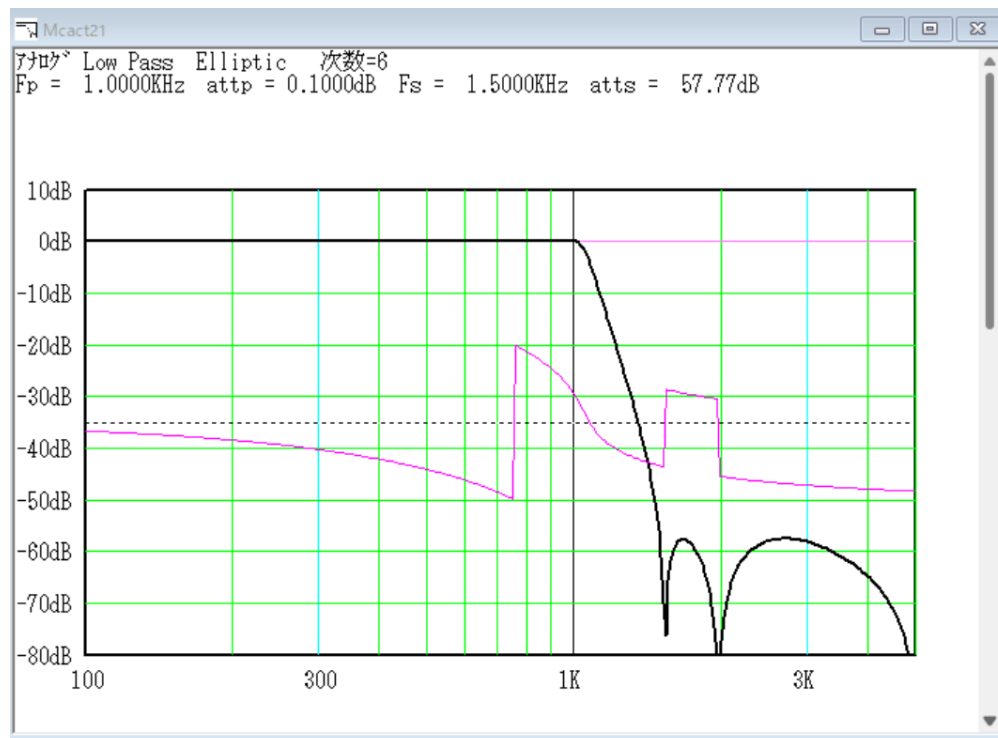
カットオフ周波数 1KHz、リップル 0.1dB の 6 次楕円関数ローパスフィルタを設計する。

## 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

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

$$H_n = \frac{P_{n_2} \cdot s^2 + P_{n_3} \cdot s + P_{n_4}}{s^2 + P_{n_0} \cdot s + P_{n_1}}$$

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	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

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

2 番目のフィルター-の伝達関数

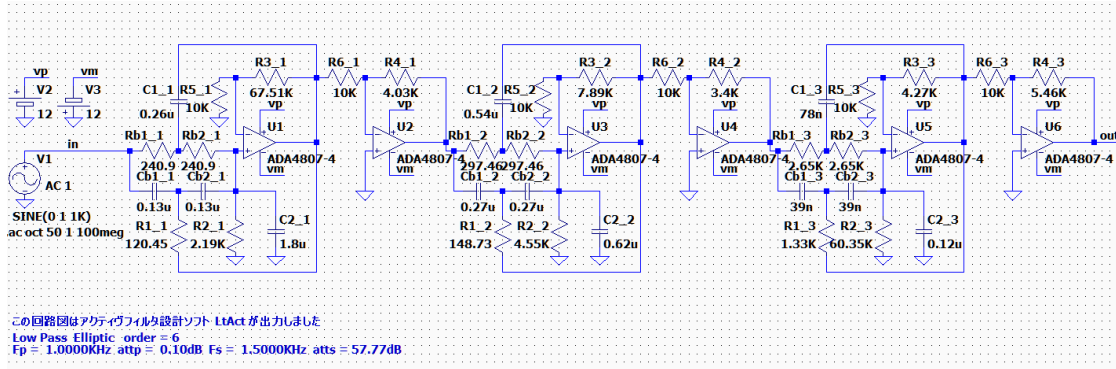
$$H_2 = \frac{0.1089 \cdot s^2 + 16.8874\text{Meg}}{s^2 + 3.4858\text{K} \cdot s + 31.3449\text{Meg}}$$

3 番目のフィルター-の伝達関数

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

## 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。

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

$$R_1 = \frac{R_b}{2}, C_1 = 2 \cdot C_b, R_2 = \frac{2 \cdot R_b}{kr}, C_2 = \frac{kd \cdot C_b}{2}, R_3 = (kk - 1) \cdot R_5$$

1 番目のフィルターの伝達関数

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

2 番目のフィルターの伝達関数

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

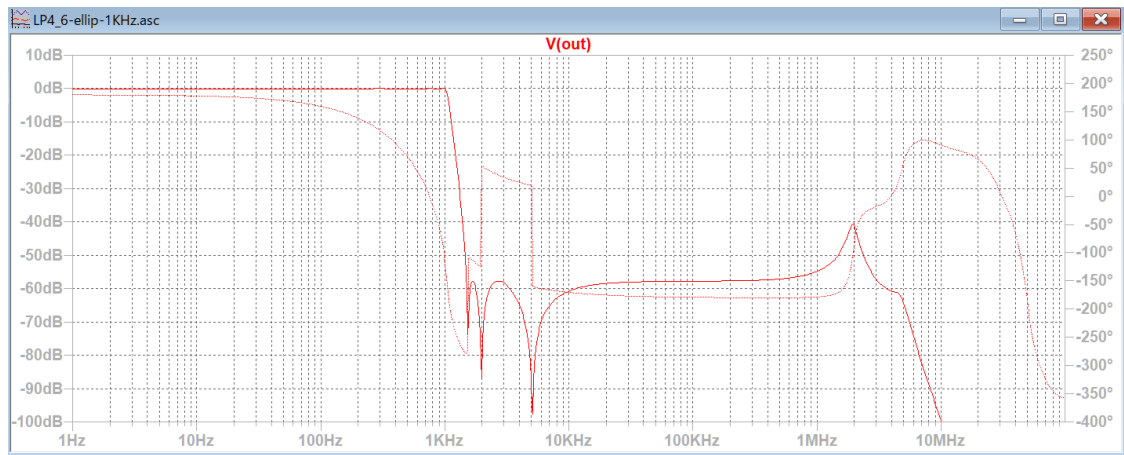
3 番目のフィルターの伝達関数

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

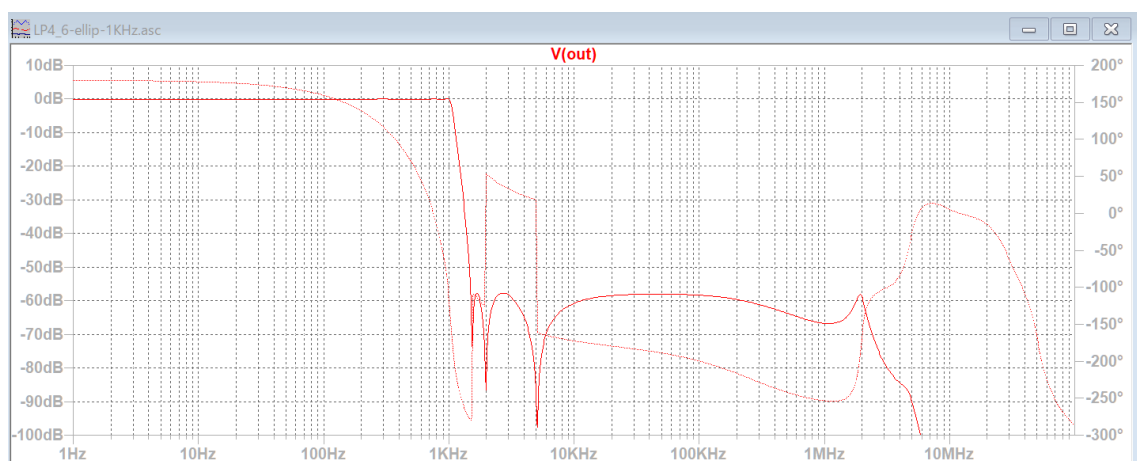
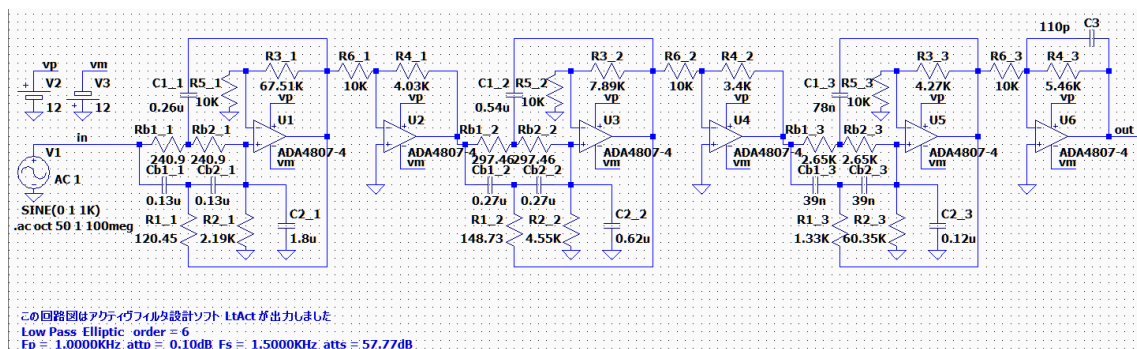
係数リストから得られた 3 つの伝達関数 H1~H3 のそれぞれが式 (2-6) を満たす抵抗値とコンデンサの値を決定することでフィルタの合成が完了します。

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

遮断特性 チェビシェフ

設計するフィルタの次数 m(<=58)

1

1

KHz

0.1

dB

OK

1.5

倍

キャンセル

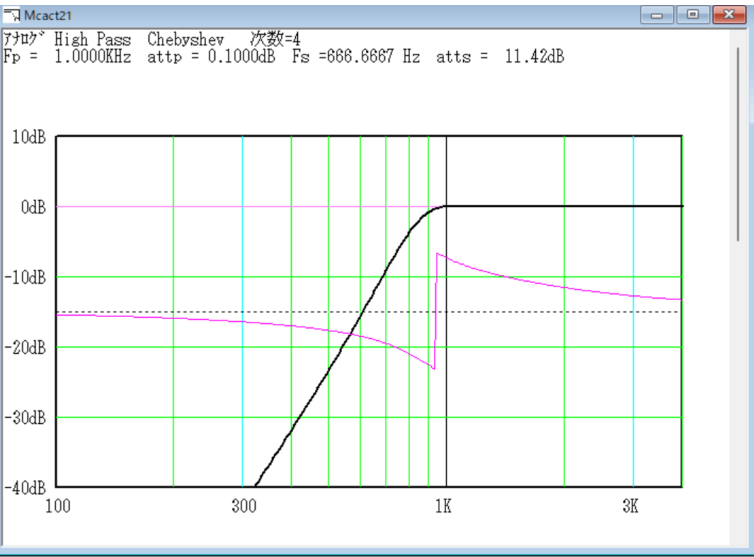
カットオフ周波数 Fc

周波数Fcにおける減衰量又はリプル attp

最低減衰量に達する周波数をFsとして、Xs =

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

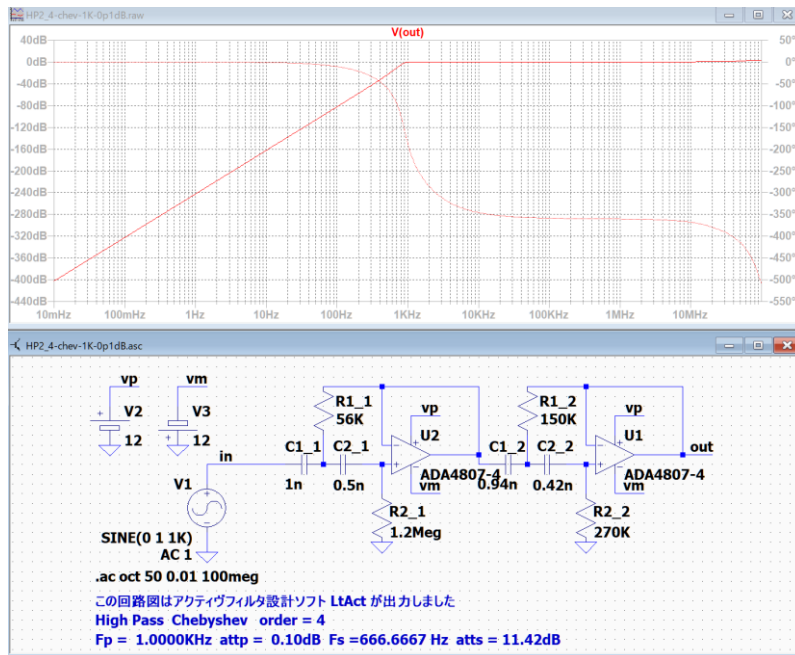
$$H_n = \frac{P_{n\_2} * s^2 + P_{n\_3} * s + P_{n\_4}}{s^2 + P_{n\_0} * s + P_{n\_1}}$$

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	2.4958K	29.6823Meg	1.0000	0	0

$F_c = 867.0999 \text{ Hz}$   $F_c \text{ ゲイン} = 6.7808 \text{ dB}$   $Q = 2.1829$   $GB \text{ 積} = 189.2819 \text{ KHz}$   
 $2 \quad 12.8650 \text{ K} \quad 63.3759 \text{ Meg} \quad 1.0000 \quad 0 \quad 0$   
 $F_c = 1.2670 \text{ KHz}$   $F_c \text{ ゲイン} = -4.1690 \text{ dB}$   $Q = 0.6188$   $GB \text{ 積} = 78.4031 \text{ KHz}$

## 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\HP2\_4-chev-1K-0p1dB.asc 作成日時 Sun Mar 23

16:55:19 2025

アナログ High Pass Chebyshev 次数=4

参照モード=0

$F_p = 1.0000 \text{ KHz}$   $att_p = 0.1000 \text{ dB}$   $F_s = 666.6667 \text{ Hz}$   $atts = 11.42 \text{ dB}$

1 (HP2) 「HP2-0-1」  $R1\_1 = 56.0000 \text{ K}$   $R2\_1 = 1.2000 \text{ Meg}$

$C1\_1 = 1.0003 \text{ n}$   $C2\_1 = 0.5012 \text{ n}$  誤差 = 1.#J %

2 (HP2) 「HP2-0-2」  $R1\_2 = 150.0000 \text{ K}$   $R2\_2 = 270.0000 \text{ K}$

$C1\_2 = 0.9379 \text{ n}$   $C2\_2 = 0.4154 \text{ n}$  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

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

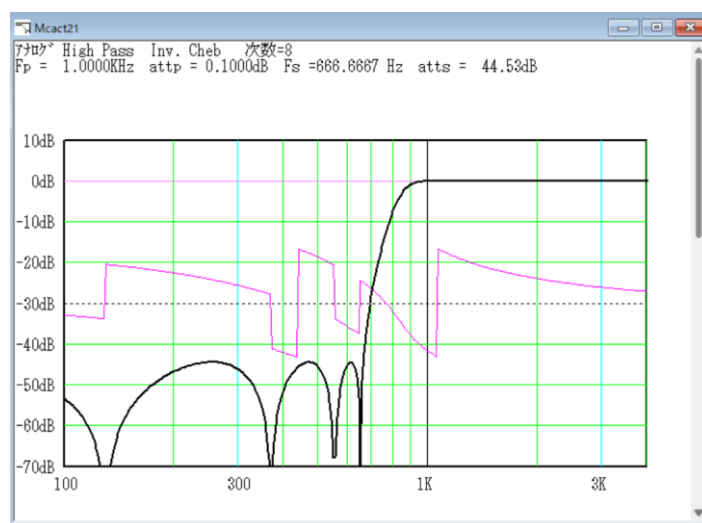
「次数を入力して…」をチェックしません。

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	単位	KHz
周波数 $F_p$ における減衰量又はリプル $att_p$	0.1	単位	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	単位	倍
周波数 $F_s$ における減衰量 $atts$	40	単位	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

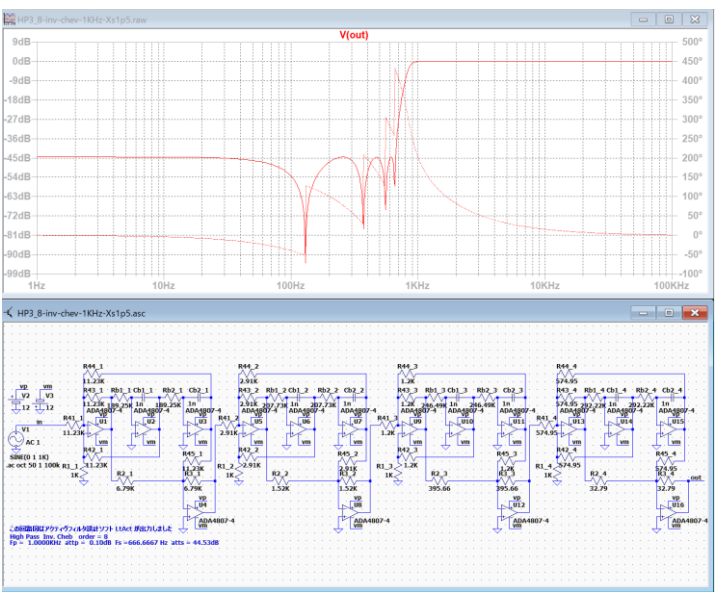
$$Pn\_2 * s^2 + Pn\_3 * s + Pn\_4$$

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

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:\LT test\HP3\_8-inv-chev-1KHz-Xs1p5.asc 作成日時 Sun Mar 23  
17:09:48 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 = 1.0000K R2\_1 = 6.7860K R3\_1 = 6.7860K R4\_1(5 個)= 11.2259K

誤差=2.03 %

2 (et1) 「HP3-0-2」 Rb\_2(2 個)=207.7340K Cb\_2(2 個)= 1.0000n 誤差=3.72 %

2 R1\_2 = 1.0000K R2\_2 = 1.5239K R3\_2 = 1.5239K R4\_2(5 個)= 2.9111K 誤

差=3.77 %

3 (et1) 「HP3-0-2」 Rb\_3(2 個)=246.4925K Cb\_3(2 個)= 1.0000n 誤差=2.63 %

3 R1\_3 = 1.0000K R2\_3 = 395.6565 R3\_3 = 395.6565 R4\_3(5 個)= 1.2024K 誤

差=2.03 %

4 (et1) 「HP3-0-2」 Rb\_4(2 個)=292.2192K Cb\_4(2 個)= 1.0000n 誤差=2.66 %

4 R1\_4 = 1.0000K R2\_4 = 32.7867 R3\_4 = 32.7867 R4\_4(5 個)= 574.9518 誤

差=2.76 %

設計 5 逆チェビシェフ・バンドパスフィルタ

通過域周波数が 10KHz から 20KHz、リプルが 0.1dB、次数が 6 次の逆チェビシェフ・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

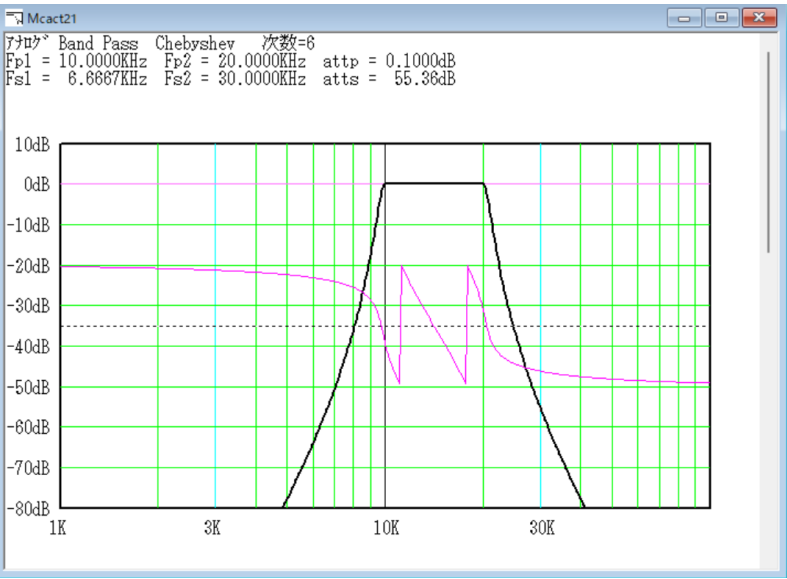
通過帯域    下端の周波数  $Fp1 : (Fs1 = Fp1/xs)$     10    KHz

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 ++++++

アノグ Band Pass Chebyshev 次数=6  
Fp1 = 10.0000KHz Fp2 = 20.0000KHz attp = 0.1000dB  
Fs1 = 6.6667KHz Fs2 = 30.0000KHz atts = 55.36dB

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	9.7297K	16.4041G	0	96.2458K	0
Fc= 20.3843KHz Fc ゲイン= 19.9057 dB Q= 13.1637 GB 積					
=265.4347MegHz					

2      4.6831K      3.8004G      0      46.3255K      0  
 $F_c = 9.8115\text{KHz}$   $F_c$  ゲイン= 19.9057 dB  $Q = 13.1637$  GB 積  
 =127.7604MegHz

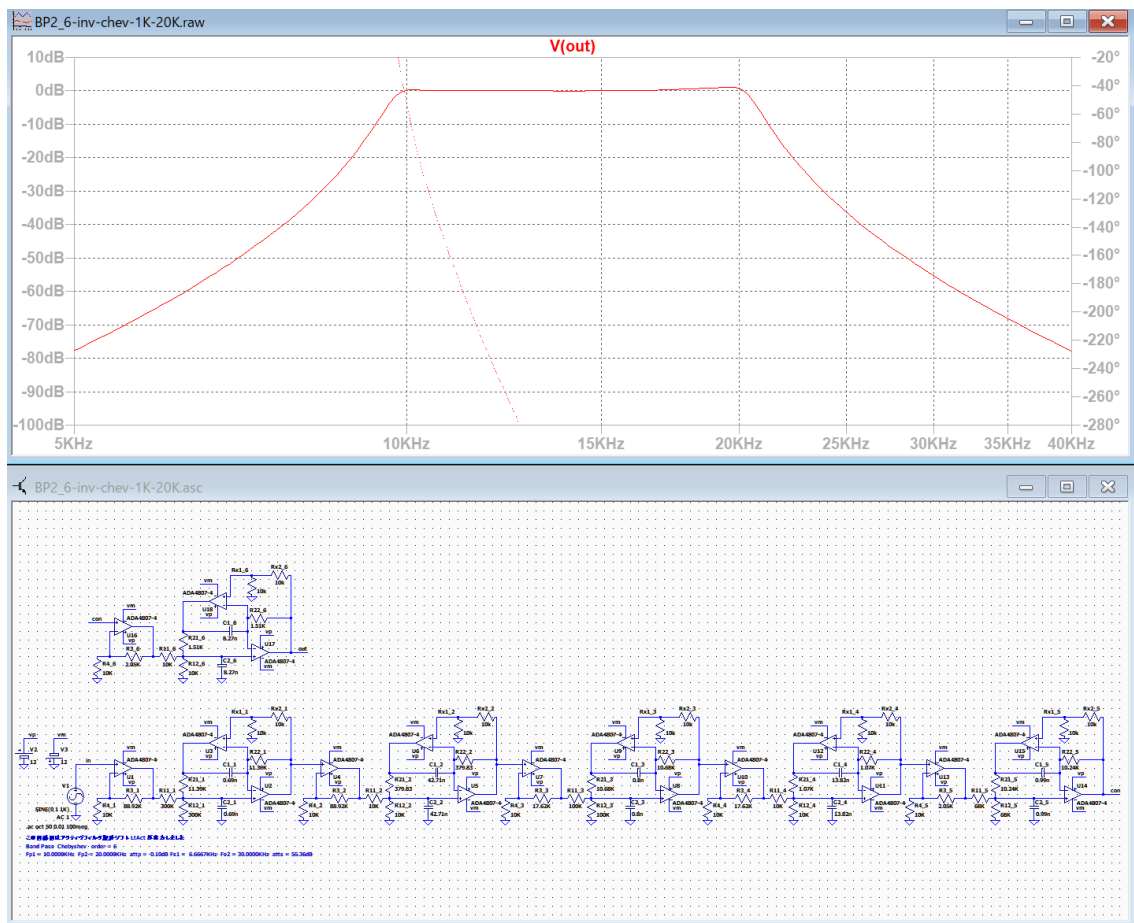
3      24.9091K      13.5943G      0      68.7994K      0  
 $F_c = 18.5566\text{KHz}$   $F_c$  ゲイン= 8.8245 dB  $Q = 4.6808$  GB 積=  
 23.9909MegHz

4      14.4674K      4.5859G      0      39.9593K      0  
 $F_c = 10.7778\text{KHz}$   $F_c$  ゲイン= 8.8245 dB  $Q = 4.6808$  GB 積=  
 13.9341MegHz

5      29.6037K      9.6645G      0      35.6739K      0  
 $F_c = 15.6462\text{KHz}$   $F_c$  ゲイン= 1.6201 dB  $Q = 3.3208$  GB 積=  
 6.2612MegHz

6      24.1856K      6.4506G      0      29.1448K      0  
 $F_c = 12.7826\text{KHz}$   $F_c$  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

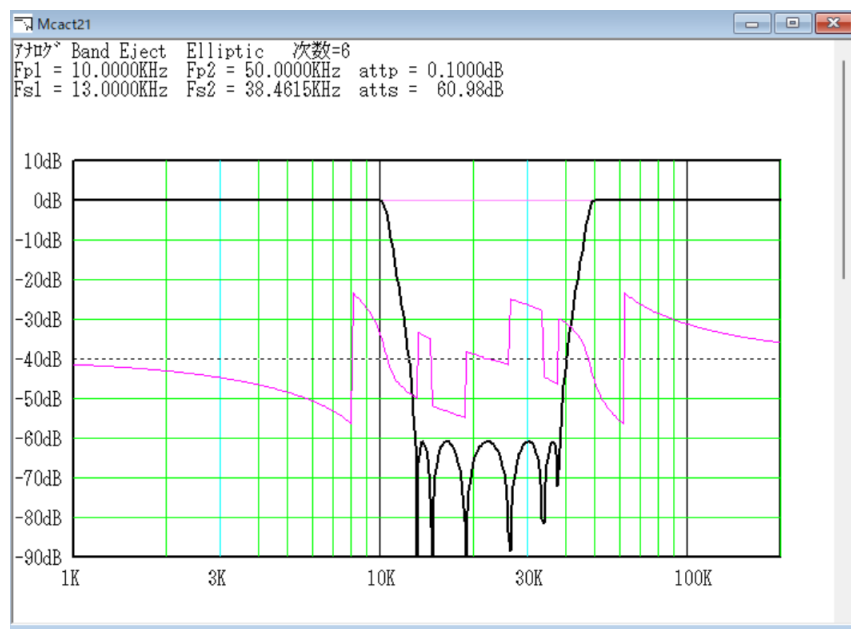
通過域周波数が 10KHz から 50KHz、リプルが 0.1dB、最低減衰量までの倍率が 1.3 で次数が 6 次の楕円関数・バンドエリミネーションフィルタを設計してみます。

設計パラメータの入力

フィルタの種類	BEフィルタ		遮断特性	Elliptic
設計するフィルタの次数 m(<=58)	6			
阻止帯域 下端の周波数 Fp1 : (Fs1 = Fp1*xs)	10	KHz		
阻止帯域 上端の周波数 Fp2 : (Fs2 = Fp2/xs)	50	KHz		
周波数Fp1,Fp2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Fs1として、xs = Fs1/Fp1 を次の範囲で入力して下さい	1 < xs < 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

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

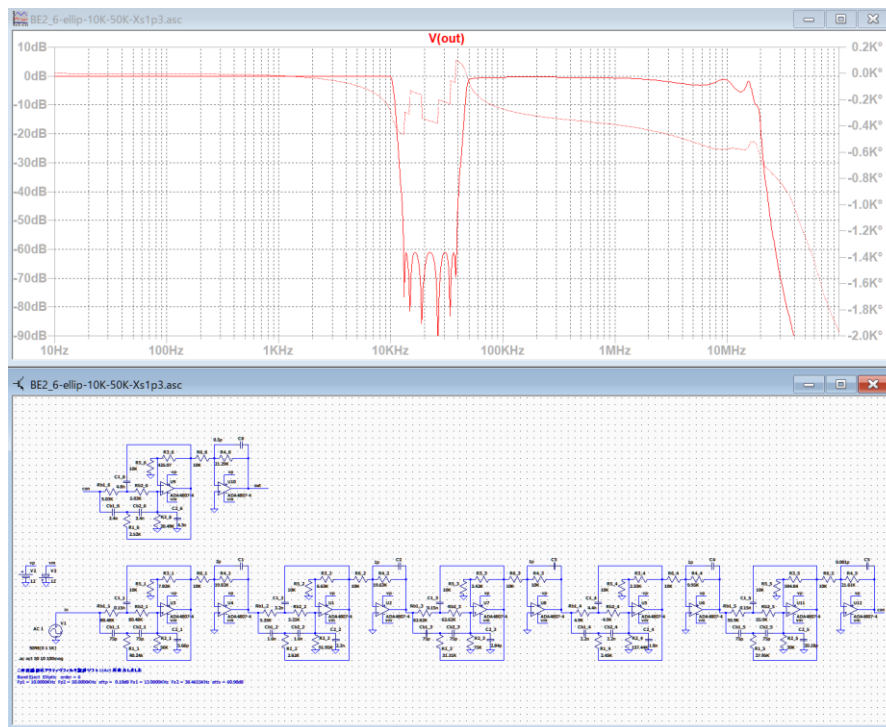
Hn = -----

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

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	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  $m(<=58)$  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

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

OK Cancel

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

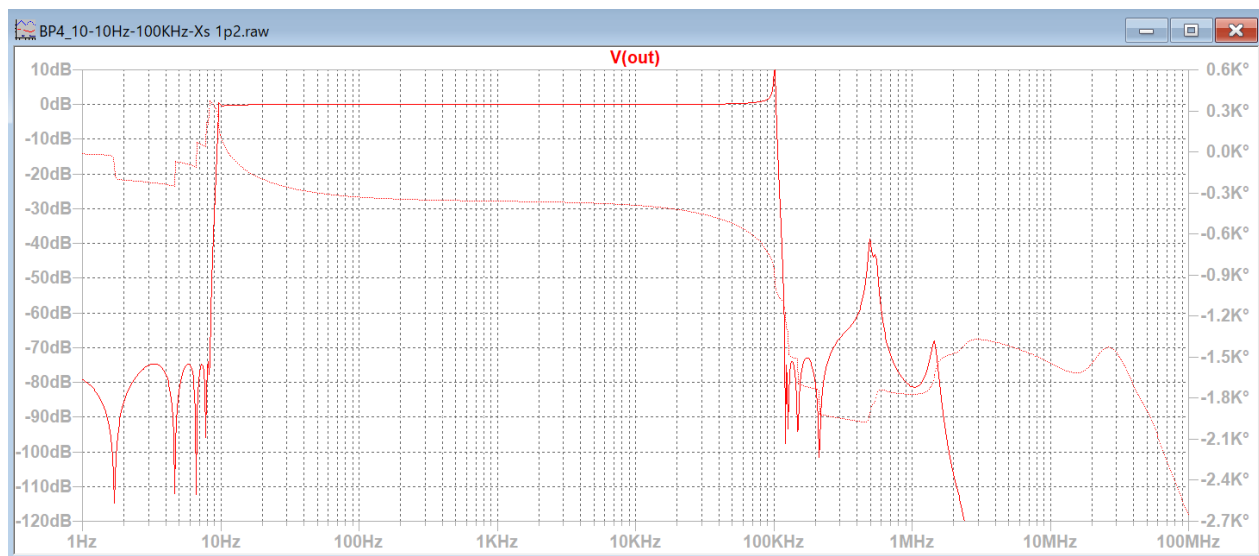
$$H_n = \frac{P_{n\_2} * s^2 + P_{n\_3} * s + P_{n\_4}}{s^2 + P_{n\_0} * s + P_{n\_1}}$$

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
		$F_c =$	103.0742K	$Q =$	18.1075 GB 積=186.6418Meg
2	3.3664	3.7159K	2.4055	0	275.1878
		$F_c =$	9.7018	$Q =$	18.1075 GB 積= 17.5675K
3	124.0526K	390.0195G	0.1959	0	354.6454G
		$F_c =$	99.3947K	$Q =$	5.0343 GB 積= 50.0381Meg
4	12.5568	3.9961K	0.9093	0	782.8964
		$F_c =$	10.0609	$Q =$	5.0343 GB 積= 5.0649K
5	261.3429K	323.7284G	0.2556	0	225.6261G
		$F_c =$	90.5546K	$Q =$	2.1771 GB 積= 19.7147Meg

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

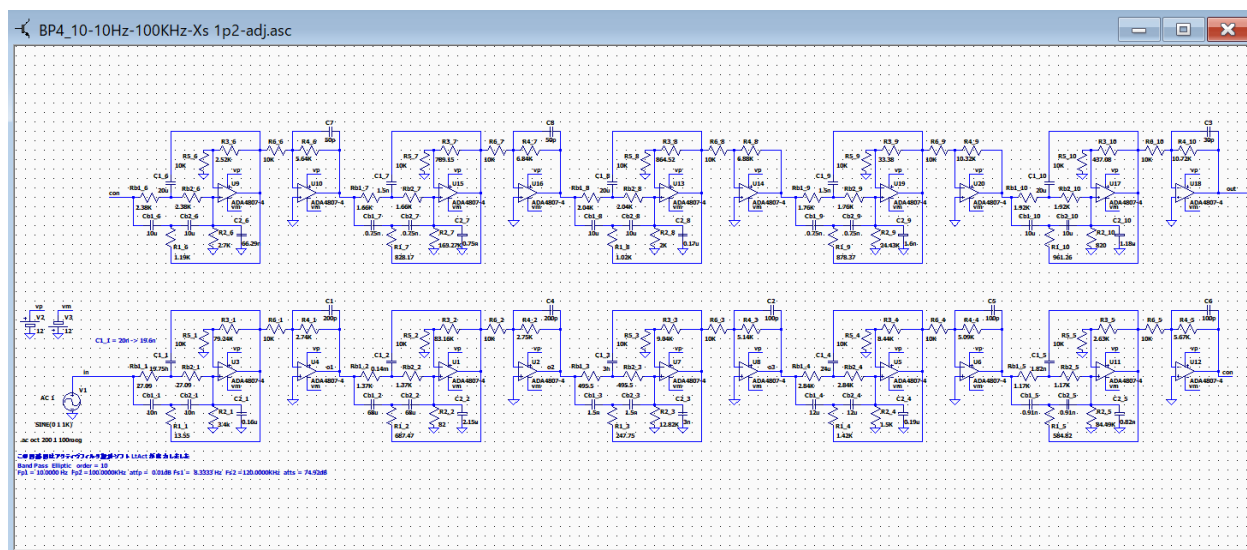


10Hz で -0.08dB と 100KHz で 8.4dB のピークが発生

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

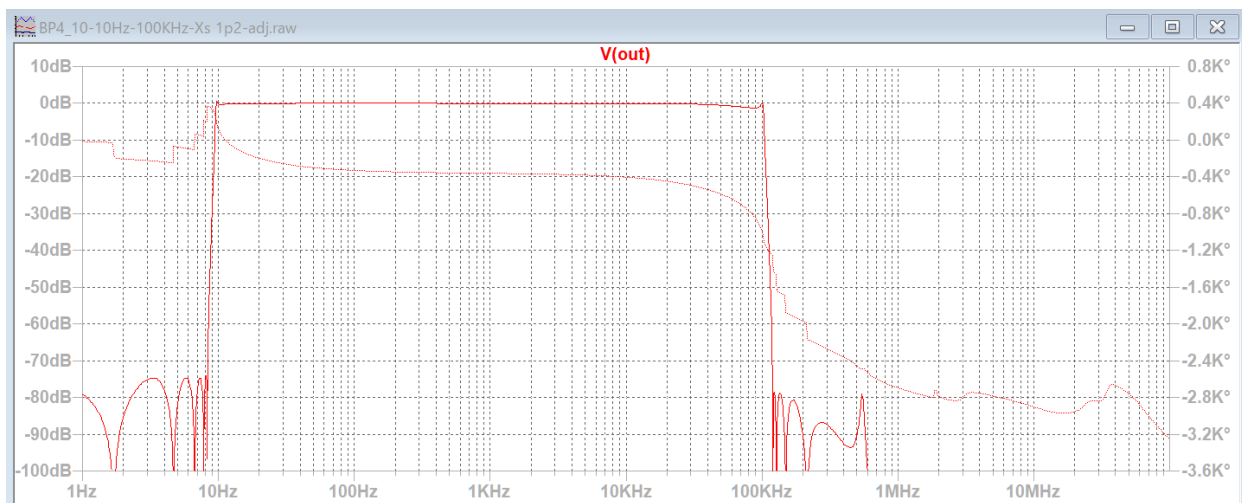
さらに、500KHz 付近にピークが発生。

## 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



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、

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

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

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

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、利得を 1 とすると、 $R_3 = R_1$  となります。  
 $C_2 = C, C_1 = mC, R_1 = R, R_2 = kR$  とすると、

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

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

(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、

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

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

(2-17) と (2-18) より、

$$m \geq 8Q_k^2 \text{ の時、} \quad (2-19)$$

$$k = \frac{m - 4Q_k^2 + \sqrt{m(m - 8Q_k^2)}}{8Q_k^2} \quad (2-20)$$

従って、(1-9) に基づき、変換係数  $Z$ 、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、 $m \geq 8Q_k^2$

### 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、

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

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

バターワースとチェビシェフ R,C 素子値の決定方法

(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、

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

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

(2-26) と (2-27) より、

$$m \geq 4Q_k^2 \quad (2-28)$$

の時、

$$k = \frac{m - 2Q_k^2 + \sqrt{m(m - 4Q_k^2)}}{2Q_k^2} \quad (2-29)$$

従って、(1-9) に基づき、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、 $m \geq 4Q_k^2$

### 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 $atts(db)$ とすると、

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 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

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

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

## 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、

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

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

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

(2-33) と (2-35) より、

$$9R_1^2 Q_k^2 = (R_1 + R_4)^2$$

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

(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、

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

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

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

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

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。

$$\begin{aligned}
 & \prod_{\nu=1}^{m/2} \left[ s^2 + x_{\nu}^2 \omega_p^2 \right]^2 + \varepsilon^2 C_2^2 \prod_{\nu=1}^{m/2} \left[ s^2 + x_{z\nu}^2 \omega_p^2 \right]^2 \\
 & = C_H^2 \prod_{\nu=1}^{m/2} \left[ s^4 + (2q_{\nu} - p_{\nu}^2) s^2 + q_{\nu}^2 \right]
 \end{aligned}$$

## 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

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

m が偶数の時

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

### 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

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

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、

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

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

従って、 $FSF = \omega_{0v} = x_v \omega_p$  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、

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

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

## 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

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

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

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

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

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

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

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

$$\omega_c = 2\pi f_c$$

## 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、

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

ここで、 $\omega_c = 1, C_1 = 1$  とすると、

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

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。

バターワースとチェビシェフ R,C 素子値の決定

$Z$  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、

$$FSF = 2\pi f_c$$

$$R_1 = Z$$

$$C_1 = 1/FSF/Z$$

(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。

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

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、

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

$$R_1 = R_2 = Z$$

$$C_1 = 1/FSF/Z$$

(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 (3-5) より  $C_3 = C_1$  となります。

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

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

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

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。

### 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、

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

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

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。

## 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 $atts(\text{db})$ 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

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

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

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

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

$$q_k = \frac{\cos(a_k) \cosh(d)}{\cosh^2(d) + \cos^2(a_k) - 1} \quad (3-16)$$

$$r_k = \omega_c \cos(a_k)$$

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

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

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

$$\omega_c = 2\pi f_c$$

## 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

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

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

## 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) より、 $R_4 = \frac{1 + kd}{kk} R_6$  (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、

$$kd = \left(\frac{r_k}{\omega_{ck}}\right)^2 (1 + kr) - 1 \quad (4-29)$$

$$kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{\omega_{ck}(1 + kd)}{r_k Q_k}}{4} \quad (4-30)$$

### 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

$$H_m(\omega_p, s) = \prod_{v=1}^{m/2} \frac{x_v^2 \left\{ s^2 + (\omega_p/x_v)^2 \right\}}{\sqrt[m/2]{C_H} q_v \left( s^2 + \frac{p_v}{q_v} \omega_p s + \frac{\omega_p^2}{q_v} \right)} \quad (3-22)$$

ただし、 $C_H$  ,  $p_v$  ,  $q_v$ は次式を満たすものとします。

$$\begin{aligned} & \prod_{v=1}^{m/2} [s^2 + x_v^2]^2 + \varepsilon^2 C_H^2 \prod_{v=1}^{m/2} [s^2 + x_{z_v}^2]^2 \\ &= C_H^2 \prod_{v=1}^{m/2} [s^4 + (2q_v - p_v^2)s^2 + q_v^2] \end{aligned}$$

### 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。

$$\begin{aligned} & \prod_{v=1}^{(m-1)/2} [s^2 + x_v^2]^2 + \varepsilon^2 C_1^2 s^2 \prod_{v=1}^{(m-1)/2} [s^2 + x_{zv}^2]^2 \\ &= -C_H^2 (s^2 - \sigma^2) \prod_{v=1}^{(m-1)/2} [s^4 + (2q_v - p_v^2) s^2 + q_v^2] \end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned} & \prod_{v=1}^{m/2} [s^2 + x_v^2]^2 + \varepsilon^2 C_2^2 \prod_{v=1}^{m/2} [s^2 + x_{zv}^2]^2 \\ &= C_H^2 \prod_{v=1}^{m/2} [s^4 + (2q_v - p_v^2) s^2 + q_v^2] \end{aligned}$$

### 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、

$$\frac{\omega_p^2}{q_v} = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \quad (4-32)$$

$$\omega_{0v}^2 = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \frac{\omega_p^2}{q_v} \quad (4-33)$$

$$\frac{p_v}{q_v} \omega_p = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1 \omega_p}{(R_1 + R_4) \sqrt{q_v}} \quad (4-34)$$

$$G = \frac{x_v^2}{(m-1)/2 \sqrt{C_H \sigma q_v}} (m = \text{odd}) \quad G = \frac{x_v^2}{m/2 \sqrt{C_H q_v}} (m = \text{even}) \text{ として、 } R_3 = GR_2$$

$$(4-32) \text{ より、 } FSF = \omega_p / \sqrt{q_v} \text{ として、 } R_b = Z, C_b = 1/Z / FSF \quad (4-35)$$

$$(4-33) \text{ より、 } R_2 = \frac{q_v \omega_{0v}^2}{\omega_p^2} R_4 \quad (4-36)$$

ただし、 $\omega_{0v} = \omega_p / x_v$  とします。

$$(4-34) \text{ より、 } R_1 = \frac{p_v}{3\sqrt{q_v} - p_v} R_4 \quad (3\sqrt{q_v} - p_v > 0) \quad (4-37)$$

### 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、

$$\omega_{0v} = \frac{1}{C_b R_b} \quad (4-38)$$

$$\frac{\omega_p^2}{q_v} = \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2 (1+kd)} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{0v}^2 \quad (4-39)$$

$$\frac{p_v}{q_v} \omega_p = \frac{kd+kr+4(1-kk)}{(1+kd)} \omega_{0v} \quad (4-40)$$

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

$$G = \frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \quad (4-41)$$

(4-39) より、

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

$$kd = \frac{q_v \omega_{0v}^2}{\omega_p^2} (1 + kr) - 1 \quad (4-42)$$

(4-40) より、

$$kk = \frac{kd + kr + 4}{4} - \frac{p_v \omega_p (1 + kd)}{4 q_v \omega_{0v}} > 1 \quad (4-43)$$

$$\therefore kr > \frac{\omega_p^2 - q_v \omega_{0v}^2 + p_v \omega_p \omega_{0v}}{\omega_p^2 + q_v \omega_{0v}^2 - p_v \omega_p \omega_{0v}}$$

$$(4-41) \text{ より、 } R_4 = \frac{1 + kd}{kk} GR_6 \quad (4-44)$$

$$\text{従って、 } kr > \max \left[ \frac{\omega_p^2}{q_v \omega_{0v}^2} - 1, \frac{\omega_p^2 - q_v \omega_{0v}^2 + p_v \omega_p \omega_{0v}}{\omega_p^2 + q_v \omega_{0v}^2 - p_v \omega_p \omega_{0v}} \right] \text{ に対して、}$$

$$FSF = \omega_{0v} = \omega_p / x_v, R_b = Z, C_b = 1/Z / FSF$$

$$R_1 = Z/2, R_2 = 2Z/kr, R_3 = (kk - 1)R_5$$

$$R_4 = \frac{1 + kd}{kk} GR_6, C_1 = 2C_b, C_2 = kdC_b/2$$

ただし、

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

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

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

$$q_k = \sin\left(\frac{\pi(2k+1+m)}{2m}\right) \dots (0 \leq k \leq l) \quad (5-33)$$

$$\omega_{ck} = 1$$

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

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w}{(1+L)Q_k} \quad (5-34)$$

$$l_1 = B_w^4 Q_k^2 + 8B_w^2 Q_k^2 \omega_c^2 - 4B_w^2 \omega_c^2 + 16Q_k^2 \omega_c^4$$

$$l_2 = B_w^2 Q_k^2 + 4Q_k^2 \omega_c^2 - 2\omega_c^2 \quad (5-35)$$

$$L = \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2}\sqrt{l_2 + \sqrt{l_1}Q_k B_w} + B_w^2 Q_k}{4Q_k \omega_c^2}$$

$$\omega_{ra} = \omega_c \sqrt{L}, \quad \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L} \quad (5-36)$$

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

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

$Q_{bp} = \omega_c / B_w$  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、

$$\begin{aligned} \frac{R_3}{2R_1} &= G \quad \therefore R_3 = 2GR_1 \\ K &= \frac{2}{CR_3} = \frac{1}{CGR_1} \\ \omega_{ra}^2 &= \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C^2} \end{aligned} \quad (6-9)$$

$R_1 = Z$  とすると、

$$R_1 = Z, \quad R_3 = 2GZ, \quad R_2 = \frac{GK^2 Z}{2\omega_{ra}^2 - GK^2}, \quad C = \frac{1}{GKZ} \quad (6-10)$$

$$\text{ただし、} \omega_{ra} > \frac{\sqrt{2G}}{2} K$$

2番目の回路については、  
同様に  $R_1 = Z$  とすると、

$$R_1 = Z, \quad R_3 = 2GZ, \quad R_2 = \frac{GM^2Z}{2\omega_{rb}^2 - GM^2}, \quad C = \frac{1}{GMZ} \quad (6-11)$$

$$\text{ただし、} \omega_{rb} > \frac{\sqrt{2G}}{2} M$$

#### 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

$Q_{bp} = \omega_c / B_w$  とすると、

$$\frac{R_3 + R_4}{R_4} = 1 \quad \therefore R_3 = 0$$

$$R_1 = Z$$

$$B_w \omega_d = \frac{\omega_c \omega_d}{Q_{bp}} = \frac{2}{CR_1} \quad \therefore C = \frac{2Q_{bp}}{\omega_c \omega_d Z} \quad (6-22)$$

$$\omega_c^2 = \left( \frac{1}{CR_2} \right)^2 \quad \therefore R_2 = \frac{1}{C\omega_c} = \frac{\omega_d}{2Q_{bp}} Z$$

$$\text{従って、} R_1 = Z, \quad R_2 = \frac{\omega_d}{2Q_{bp}} Z, \quad R_3 = 0, \quad R_4 = 10K, \quad C = \frac{2Q_{bp}}{Z\omega_c} \quad (6-23)$$

### 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、

$$\frac{R_3 + R_4}{R_4} = G \quad \therefore R_3 = (G-1)R_4$$

$$R_1 = Z$$

$$K = \frac{2}{CR_1} \quad \therefore C = \frac{2}{KR_1} = \frac{2}{KZ} \quad (6-14)$$

$$\omega_{ra}^2 = \left( \frac{1}{CR_2} \right)^2 \quad \therefore R_2 = \frac{1}{C\omega_{ra}} = \frac{KZ}{2\omega_{ra}}$$

$$\text{従って、} R_1 = Z, \quad R_2 = \frac{K}{2\omega_{ra}} Z, \quad R_3 = (G-1)R_4, \quad C = \frac{2}{KZ} \text{ ただし、} G > 1 \quad (6-15)$$

バターワースとチェビシェフ R,C 素子値の決定

2番目の回路については、  
同様に

$$R_1 = Z, \quad R_2 = \frac{M}{2\omega_{rb}} Z, \quad R_3 = (G-1)R_4, \quad C = \frac{2}{MZ} \quad \text{ただし、} G > 1 \quad (6-16)$$

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

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

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

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

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

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

(5-48)

$$r_k = \cos(a_k)$$

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

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

$$\omega_d = 1/\sinh(d)$$

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w \omega_{ck}}{(1+L)Q_k} \quad (5-49)$$

$$\begin{aligned} l_1 &= B_w^4 Q_k^2 \omega_{ck}^4 + 8B_w^2 Q_k^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 - 4B_w^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 + 16Q_k^2 \omega_c^4 \\ l_2 &= B_w^2 Q_k^2 \omega_{ck}^2 + 4Q_k^2 \omega_c^2 - 2\omega_c^2 \\ L &= \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2}\sqrt{l_2} + \sqrt{l_1} Q_k B_w \omega_{ck} + B_w^2 Q_k \omega_{ck}^2}{4Q_k \omega_c^2} \end{aligned} \quad (5-50)$$

$$\begin{aligned} n_1 &= B_w^2 + 4r_k^2 \omega_c^2 \\ n_2 &= B_w^2 + 2r_k^2 \omega_c^2 \\ N &= \frac{\sqrt{n_1} B_w + n_2}{2r_k^2 \omega_c^2} \end{aligned} \quad (5-51)$$

$$\omega_{ra} = \sqrt{L} \omega_c, \quad \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L}, \quad \omega_{za} = \sqrt{N} \omega_c, \quad \omega_{zb} = \omega_c / \sqrt{N}, \quad G = r_k \omega_{ck} \sqrt{N/L}$$

(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、

$$G = r_k \omega_{ck} \sqrt{N/L} \quad (5-52)$$

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、

$Q_{bp} = \omega_c / B_w$  とすると、

$$\frac{R_3 + R_4}{R_4} = 1 \quad \therefore R_3 = 0$$

$$R_1 = Z$$

$$B_w \omega_d = \frac{\omega_c \omega_d}{Q_{bp}} = \frac{2}{CR_1} \quad \therefore C = \frac{2Q_{bp}}{\omega_c \omega_d Z} \quad (6-29)$$

$$\omega_c^2 = \left(\frac{1}{CR_2}\right)^2 \quad \therefore R_2 = \frac{1}{C\omega_c} = \frac{\omega_d}{2Q_{bp}} Z$$

$$\text{従って、} R_1 = Z, \quad R_2 = \frac{\omega_d}{2Q_{bp}} Z, \quad R_3 = 0, \quad R_4 = 10K, \quad C = \frac{2Q_{bp}}{Z\omega_c} \quad (6-30)$$

**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、

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{K}{3\omega_{ra} - K} R_4, \quad R_2 = \frac{\omega_{za}^2}{\omega_{ra}^2} R_4 = \frac{N}{L} R_4 \\ R_3 &= G R_4, \quad C_b = \frac{1}{Z \omega_{ra}}, \quad R_b = Z \end{aligned} \quad (6-35)$$

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、

$$G = \frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} \quad (6-50)$$

$$\omega_{zb}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \quad (6-51)$$

$$M = \frac{kd+kr+4(1-kk)}{C_b R_b(1+kd)} = \frac{kd+kr+4(1-kk)}{1+kd} \omega_{zb} \quad (6-52)$$

$$\omega_{rb}^2 = \frac{1+kr}{C_b^2 R_b^2(1+kd)} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{zb}^2 \quad (6-53)$$

(6-53) より、

$$kr = \frac{N}{L}(1+kd) - 1 > \frac{N}{L} - 1 > 0 \dots \dots \Theta \quad kd > 0, \quad \frac{N}{L} > 1 \quad (6-54)$$

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  $att_p(\text{db})$ 、周波数 $\omega_{s1}$ において最低減衰量  $atts(\text{db})$ 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

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

$m$ が偶数の時

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

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

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

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

とする時、

$m$ が奇数の時

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{1}{C_H \sigma} \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} \frac{(s^2 + N\omega_c^2)}{(s^2 + Ks + L\omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2/N)}{(s^2 + Ms + \omega_c^2/L)}$$

$$= \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{\nu=1}^{(m-1)/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)}$$

$$G = \sqrt{N/L} / {}^{(m-1)}\sqrt{C_H \sigma}$$

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**

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{1}{C_H} \prod_{v=1}^{m/2} \frac{(s^2 + N\omega_c^2)}{(s^2 + Ks + L\omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2/N)}{(s^2 + Ms + \omega_c^2/L)}$$

$$= \prod_{v=1}^{m/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)}$$
(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。

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

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

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w p_v}{1 + L}$$
(5-21)

$$l_1 = B_w^4 q_v^2 - 4B_w^2 p_v^2 \omega_c^2 + 8B_w^2 q_v \omega_c^2 + 16\omega_c^4$$

$$l_2 = B_w^2 q_v^2 - 2p_v^2 \omega_c^2 + 4q_v \omega_c^2$$
(5-22)

$$L = \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2} \sqrt{l_2 + \sqrt{l_1} q_v B_w} + B_w^2 q_v}{4\omega_c^2}$$

$$n_1 = B_w^2 x_v^2 + 4\omega_c^2, \quad n_2 = B_w^2 x_v^2 + 2\omega_c^2$$

$$N = \frac{\sqrt{n_1} B_w x_v + n_2}{2\omega_c^2}$$
(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、

$$G = \sqrt{N/L} / \sqrt[m]{C_H} \sigma \dots\dots m = even$$

$$G = \sqrt{N/L} / \sqrt[m]{C_H} \dots\dots\dots m = odd$$
(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、

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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{1}{C_H \sigma} \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{(s^2 + N\omega_c^2)}{(s^2 + Ks + L\omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2/N)}{(s^2 + Ms + \omega_c^2/L)} \quad (5-55)$$

$$= \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)}$$

$$G = \sqrt{N/L} / {}^{(m-1)}\sqrt{C_H \sigma}$$

### 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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{1}{C_H \sigma} \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{(s^2 + N \omega_c^2)}{(s^2 + K s + L \omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2 / N)}{(s^2 + M s + \omega_c^2 / L)} \quad (5-55)$$

$$= \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + K s + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + M s + \omega_{rb}^2)}$$

$$G = \sqrt{N/L} / \sqrt[ (m-1) ]{C_H \sigma}$$

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、

$$R_1 = \frac{K}{3\omega_{ra} - K} R_4, \quad R_2 = \frac{\omega_{za}^2}{\omega_{ra}^2} R_4 = \frac{N}{L} R_4 \quad (6-35)$$

$$R_3 = G R_4, \quad C_b = \frac{1}{Z \omega_{ra}}, \quad R_b = Z$$

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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{1}{C_H \sigma} \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{(s^2 + N \omega_c^2)}{(s^2 + K s + L \omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2 / N)}{(s^2 + M s + \omega_c^2 / L)} \quad (5-55)$$

$$= \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + K s + \omega_{ra}^2)} \frac{G (s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + M s + \omega_{rb}^2)}$$

$$G = \sqrt{N/L} / {}^{(m-1)}\sqrt{C_H \sigma}$$

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、

$$R_1 = \frac{M}{3\omega_{rb} - M} R_4, \quad R_2 = \frac{\omega_{zb}^2}{\omega_{rb}^2} R_4 = \frac{L}{N} R_4 \quad (6-40)$$

$$R_3 = \frac{GL}{N} R_4, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{rb}}, \quad R_b = Z$$

## 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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{1}{C_H \sigma} \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{(s^2 + N \omega_c^2)}{(s^2 + K s + L \omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2 / N)}{(s^2 + M s + \omega_c^2 / L)} \quad (5-55)$$

$$= \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + K s + \omega_{ra}^2)} \frac{G(s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + M s + \omega_{rb}^2)}$$

$$G = \sqrt{N/L} / \sqrt{(m-1)} \sqrt{C_H \sigma}$$

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、

$$kd = \frac{N}{L}(1+kr) - 1 > \frac{N}{L} - 1 > 0 \dots \dots \Theta \quad kr > 0, \quad \frac{N}{L} > 1 \quad (6-45)$$

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) を代入して、 $kk > 1$  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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{1}{C_H \sigma} \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{(s^2 + N \omega_c^2)}{(s^2 + K s + L \omega_c^2)} \frac{(s^2 + \omega_c^2 / N)}{(s^2 + M s + \omega_c^2 / L)} \quad (5-55)$$

$$= \frac{B_w \sigma}{s^2 + B_w \sigma s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G \frac{L}{N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + K s + \omega_{ra}^2)} \frac{G (s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + M s + \omega_{rb}^2)}$$

$$G = \sqrt{N/L} / {}^{(m-1)}\sqrt{C_H \sigma}$$

et2 の伝達関数は、

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

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

(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、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-31)$$

$m$  が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-32)$$

(7-31), (7-32) において

$$p_k = \cos\left(\frac{\pi(2k+1+m)}{2m}\right) \dots (0 \leq k \leq l) \quad (7-33)$$

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

$$\omega_{ck} = 1, \quad Q_k = -\frac{\sqrt{p_k^2 + q_k^2}}{2p_k} = -\frac{1}{2p_k}$$

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w}{(1+L)Q_k \omega_{ck}} \quad (7-34)$$

$$l_1 = B_w^4 Q_k^2 + 8B_w^2 Q_k^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 - 4B_w^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 + 16Q_k^2 \omega_c^4 \omega_{ck}^4$$

$$l_2 = B_w^2 Q_k^2 + 4Q_k^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 - 2\omega_c^2 \omega_{ck}^2 \quad (7-35)$$

$$L = \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2}\sqrt{l_2} + \sqrt{l_1} Q_k B_w + B_w^2 Q_k}{4Q_k \omega_c^2 \omega_{ck}^2}$$

$$\omega_{ra} = \sqrt{L} \omega_c, \quad \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L} \quad (7-36)$$

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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-31)$$

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、

$$\frac{R_3}{R_2} = \sqrt{L} \quad \therefore R_3 = \sqrt{L} R_2$$

$$\omega_{ra}^2 = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \dots \therefore \omega_{ra} = \frac{1}{C_b R_b}$$

$$\omega_c^2 = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{ra}^2 \dots \therefore R_2 = \frac{R_4}{L}$$

$$K = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_{ra}$$

$$\therefore R_1 = \frac{KR_4}{3\omega_{ra} - K}, \quad R_2 = \frac{R_4}{L}, \quad R_3 = \frac{R_4}{\sqrt{L}}$$

$$\omega_{ra} > \frac{K}{3} \quad (8-4)$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{ra}}$$

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

$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{1}{\sqrt{L}} \quad \therefore R_3 = \frac{1}{\sqrt{L}} R_2 \quad (8-5)$$

$$\omega_{rb}^2 = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \dots \therefore \omega_{rb} = \frac{1}{C_b R_b}$$

$$\omega_c^2 = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{rb}^2 \dots \therefore R_2 = LR_4$$

$$M = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_{rb}$$

$$\therefore R_1 = \frac{MR_4}{3\omega_{rb} - M}, \quad R_2 = LR_4, \quad R_3 = \sqrt{L}R_4$$

$$\omega_{rb} > \frac{M}{3}$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{rb}}$$

#### 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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2}{s^2 + \omega_c^2} \quad (7-31)$$

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、

$R_b = Z$ ,  $Q_{be} = \omega_c / B_w$  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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + B_w s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-31)$$

et2 の伝達関数は、

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

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

(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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + B_\omega s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-31)$$

et2 の伝達関数は、

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

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

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = \frac{1}{\sqrt{L}} \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)R_6}{kk\sqrt{L}} \quad (8-17)$$

$$\omega_c^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \quad (8-18)$$

$$\omega_{rb}^2 = \frac{\omega_c^2}{L} = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \frac{1+kr}{1+kd}$$

$$\therefore kd = L(1+kr) - 1 > L - 1 \text{ に対して、 } kr = \frac{1+kd}{L} - 1 \quad (8-19)$$

$$M = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} = \frac{kd+kr+4-4kk}{1+kd} \omega_c$$

$$\therefore kk = \frac{kd+kr+4 - \frac{M(1+kd)}{\omega_c}}{4} \quad (8-20)$$

$$(8-19) \text{ を代入して、} kk > 1 \text{ より、} kd > \frac{(L-1)\omega_c + K}{(L+1)\omega_c - K} \quad (8-21)$$

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、

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-39)$$

$m$  が偶数であれば、

$$H_m(\omega_c, s) = \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-40)$$

(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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2) / \sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{na}^2} \frac{s^2 + Ms + \omega_{nb}^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \quad (7-39)$$

et1 の伝達関数は、

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

#### 1 次の回路の素子値決定

(7-39) の 1 次の部分と (2-5) より、

$R_b = Z$ ,  $Q_{be} = \omega_c / B_w$  とすると、

$$\frac{R_3}{R_2} = 1 \quad \therefore R_3 = R_2$$

$$\omega_c^2 = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} \dots \therefore R_2 = R_4$$

$$\frac{B_w}{\omega_d} = \frac{\omega_c}{\omega_d Q_{be}} = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_c \quad (8-23)$$

$$\therefore R_1 = \frac{R_4}{3\omega_d Q_{be} - 1}, \quad R_2 = R_3 = R_4$$

$$Q_{be} > \frac{1}{3\omega_d}$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}$$

## 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、

$$\frac{R_3}{R_2} = \sqrt{L} \quad \therefore R_3 = \sqrt{L}R_2$$

$$\omega_{ra}^2 = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \dots \therefore \omega_{ra} = \frac{1}{C_b R_b}$$

$$\omega_c^2 = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{ra}^2 \dots \therefore R_2 = \frac{R_4}{L}$$

$$K = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_{ra} \quad (8-24)$$

$$\therefore R_1 = \frac{KR_4}{3\omega_{ra} - K}, \quad R_2 = \frac{R_4}{L}, \quad R_3 = \frac{R_4}{\sqrt{L}}$$

$$\omega_{ra} > \frac{K}{3}$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{ra}}$$

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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2) / \sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{1}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-39)$$

et1 の伝達関数は、

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

(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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d}s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{1}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \tag{7-39}$$

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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d}s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L}(s^2 + \omega_c^2)(s^2 + \omega_c^2)/\sqrt{L}}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-39)$$

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  $\text{atts}(\text{db})$  とするとき、 $l = \text{ceil}((\text{double})(m-1)/2) - 1$  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

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

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

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

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

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

(7-48)

$$r_k = \cos(a_k)$$

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

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

$$\omega_d = 1/\sinh(d)$$

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w}{(1+L)Q_k\omega_{ck}} \quad (7-49)$$

$$\begin{aligned} l_1 &= B_w^4 Q_k^2 + 8B_w^2 Q_k^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 - 4B_w^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 + 16Q_k^2 \omega_c^4 \omega_{ck}^4 \\ l_2 &= B_w^2 Q_k^2 + 4Q_k^2 \omega_c^2 \omega_{ck}^2 - 2\omega_c^2 \omega_{ck}^2 \\ L &= \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2}\sqrt{l_2 + \sqrt{l_1}Q_k B_w} + B_w^2 Q_k}{4Q_k \omega_c^2 \omega_{ck}^2} \end{aligned} \quad (7-50)$$

$$\begin{aligned} n_1 &= B_w^2 r_k^2 + 4\omega_c^2 \\ n_2 &= B_w^2 r_k^2 + 2\omega_c^2 \\ N &= \frac{\sqrt{n_1} B_w r_k + n_2}{2\omega_c^2} \end{aligned} \quad (7-51)$$

$$\omega_{ra} = \sqrt{L}\omega_c, \quad \omega_{rb} = \omega_c/\sqrt{L}, \quad \omega_{za} = \sqrt{N}\omega_c, \quad \omega_{zb} = \omega_c/\sqrt{N}, \quad G = r_k \omega_{ck} \sqrt{N/L}$$

(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、

$$A_2 = \sqrt{L/N} \quad (7-52)$$

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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d}s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L/N}(s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{N/L}(s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-46)$$

et1 の伝達関数は、

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

(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、

$$\frac{R_3}{R_2} = \sqrt{\frac{L}{N}} \quad \therefore R_3 = \sqrt{\frac{L}{N}} R_2$$

$$\omega_{ra}^2 = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \dots \therefore \omega_{ra} = \frac{1}{C_b R_b}$$

$$\omega_{za}^2 = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{ra}^2 \dots \therefore R_2 = \frac{NR_4}{L}$$

$$K = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_{ra} \quad (8-44)$$

$$\therefore R_1 = \frac{KR_4}{3\omega_{ra} - K}, \quad R_2 = \frac{NR_4}{L}, \quad R_3 = \sqrt{\frac{N}{L}} R_4$$

$$\omega_{ra} > \frac{K}{3}$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{ra}}$$

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

$$\begin{aligned} \frac{R_3}{R_2} &= \sqrt{\frac{N}{L}} \quad \therefore R_3 = \sqrt{\frac{N}{L}} R_2 \\ \omega_{rb}^2 &= \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \cdots \therefore \omega_{rb} = \frac{1}{C_b R_b} \\ \omega_{zb}^2 &= \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{rb}^2 \cdots \therefore R_2 = \frac{L R_4}{N} \\ M &= \frac{3 R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3 R_1}{R_1 + R_4} \omega_{rb} \\ \therefore R_1 &= \frac{M R_4}{3 \omega_{rb} - M}, \quad R_2 = \frac{L R_4}{N}, \quad R_3 = \sqrt{\frac{L}{N}} R_4 \\ \omega_{rb} &> \frac{M}{3} \\ R_b &= Z, \quad C_b = \frac{1}{Z \omega_{rb}} \end{aligned} \quad (8-45)$$

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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L/N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{N/L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-46)$$

et2 の伝達関数は、

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

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

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、

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = 1 \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)R_6}{kk} \quad (8-46)$$

$$\omega_c^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \frac{1+kr}{1+kd} \quad (8-47)$$

$$\therefore kr = kd$$

$$\frac{B_w}{\omega_d} = \frac{\omega_c}{\omega_d Q_{be}} = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} = \frac{2kd+4-4kk}{1+kd} \omega_c$$

$$\therefore kk = \frac{(2\omega_d Q_{be} - 1)kd + 4\omega_d Q_{be} - 1}{4\omega_d Q_{be}} \quad (8-48)$$

$$kk > 1 \quad \therefore (2\omega_d Q_{be} - 1)kd > 1 \quad \therefore Q_{be} > \frac{\frac{1}{2\omega_d} + 1}{\frac{kd}{2\omega_d}} > \frac{1}{2\omega_d} \text{ を満たす } Q_{be} \text{ に対して、}$$

$$kd > \frac{1}{2\omega_d Q_{be} - 1} \quad (8-49)$$

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、

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = \sqrt{\frac{L}{N}} \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)}{kk} \sqrt{\frac{L}{N}} R_6 \quad (8-51)$$

$$\omega_{za}^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \therefore \omega_{za} = \frac{1}{C_b R_b} \quad (8-52)$$

$$\omega_{ra}^2 = \left( \frac{1}{C_b R_b} \right)^2 \frac{1+kr}{1+kd} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{za}^2$$

$$\therefore kr = \frac{L(1+kd)}{N} - 1 > \frac{L}{N} - 1 \text{ に対して、 } kd = \frac{N(1+kr)}{L} - 1 \quad (8-53)$$

$$K = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b (1+kd)} = \frac{kd+kr+4-4kk}{1+kd} \omega_{za} \quad (8-54)$$

$$\therefore kk = \frac{kd+kr+4 - \frac{K(1+kd)}{\omega_{za}}}{4}$$

$$(8-53) \text{ を代入して、 } kk > 1 \text{ より、 } kr > \frac{(L-N)\omega_{za} + KN}{(L+N)\omega_{za} - KN} \quad (8-55)$$

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。

$$H_m(\omega_c, s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\omega_d} s + \omega_c^2} \prod_{k=0}^l \frac{\sqrt{L/N} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{N/L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \quad (7-46)$$

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、

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = \sqrt{\frac{N}{L}} \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)}{kk} \sqrt{\frac{N}{L}} R_6 \quad (8-57)$$

$$\omega_{zb}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \quad \therefore \omega_{zb} = \frac{1}{C_b R_b} \quad (8-58)$$

$$\omega_{rb}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \frac{1+kr}{1+kd} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{zb}^2$$

$$\therefore kd = \frac{L(1+kr)}{N} - 1 > \frac{L}{N} - 1 \text{ に対して、 } kr = \frac{N(1+kd)}{L} - 1 \quad (8-59)$$

$$M = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} = \frac{kd+kr+4-4kk}{1+kd} \omega_{zb}$$

$$\therefore kk = \frac{kd+kr+4 - \frac{M(1+kd)}{\omega_{zb}}}{4} \quad (8-60)$$

$$(8-59) \text{ を代入して、} kk > 1 \text{ より、} kd > \frac{(L-N)\omega_{zb} + K}{(L+N)\omega_{zb} - K} \quad (8-61)$$

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**

$$\begin{aligned}
 H_m(\omega_p, s) &= \frac{1}{C_H} \prod_{v=1}^{m/2} \frac{\sqrt{\frac{L}{N}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{\frac{N}{L}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \\
 &= \prod_{v=1}^{m/2} \frac{G(s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{G \frac{N}{L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \\
 G &= \frac{x_v}{\sqrt[m]{C_H}} \sqrt{\frac{L}{q_v N}}
 \end{aligned} \tag{7-56}$$

ただし、 $C_H$ 、 $p_v$ 、 $q_v$ は次式を満たすものとします。

$$\begin{aligned}
 &\prod_{v=1}^{m/2} [s^2 + x_v^2]^2 + \varepsilon^2 C_2^2 \prod_{v=1}^{m/2} [s^2 + x_{zv}^2]^2 \\
 &= C_H^2 \prod_{v=1}^{m/2} [s^4 + (2q_v - p_v^2)s^2 + q_v^2]
 \end{aligned}$$

$$K = LM, \quad M = \frac{B_w p_v}{(1+L)q_v} \tag{7-21}$$

$$\begin{aligned}
 l_1 &= B_w^4 - 4B_w^2 p_v^2 \omega_c^2 + 8B_w^2 q_v \omega_c^2 + 16q_v^2 \omega_c^4 \\
 l_2 &= B_w^2 - 2p_v^2 \omega_c^2 + 4q_v \omega_c^2 \\
 L &= \frac{\sqrt{l_1} + \sqrt{2} \sqrt{l_2 + \sqrt{l_1}} B_w + B_w^2}{4q_v \omega_c^2}
 \end{aligned} \tag{7-22}$$

$$\omega_{ra} = \sqrt{L} \omega_c, \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L}$$

$$n_1 = B_w^2 + 4x_v^2 \omega_c^2, \quad n_2 = B_w^2 + 2x_v^2 \omega_c^2$$

$$N = \frac{\sqrt{n_1} B_w + n_2}{2x_v^2 \omega_c^2} \tag{7-24}$$

$$\omega_{za} = \sqrt{N} \omega_c, \omega_{zb} = \omega_c / \sqrt{N}$$

(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、

$$\begin{aligned}
 G &= \frac{x_v}{(C_H \sigma)^{\frac{1}{\text{int}(m/2)*2}}} \sqrt{\frac{L}{q_v N}} \dots\dots\dots m = \text{even} \\
 G &= \frac{x_v}{(C_H)^{\frac{1}{\text{int}(m/2)*2}}} \sqrt{\frac{L}{q_v N}} \dots\dots\dots m = \text{odd}
 \end{aligned} \tag{7-57}$$

$$\omega_{ra} = \sqrt{L} \omega_c, \quad \omega_{rb} = \omega_c / \sqrt{L}, \quad \omega_{za} = \sqrt{N} \omega_c, \quad \omega_{zb} = \omega_c / \sqrt{N}, \quad G = r_k \omega_{ck} \sqrt{N/L}$$

### 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、

$R_b = Z$ ,  $Q_{be} = \omega_c / B_w$  とすると、

$$\frac{R_3}{R_2} = 1 \quad \therefore R_3 = R_2$$

$$\omega_c^2 = \frac{1}{C_b^2 R_b^2} = \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} \dots \therefore R_2 = R_4$$

$$\frac{B_w}{\sigma} = \frac{\omega_c}{\sigma Q_{be}} = \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_c \tag{8-63}$$

$$\therefore R_1 = \frac{R_4}{3\sigma Q_{be} - 1}, \quad R_2 = R_3 = R_4$$

$$Q_{be} > \frac{1}{3\sigma}$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}$$

## 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、

$$\begin{aligned}\frac{R_3}{R_2} &= G \quad \therefore R_3 = GR_2 \\ \omega_{ra}^2 &= \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \cdots \therefore \omega_{ra} = \frac{1}{C_b R_b} \\ \omega_{za}^2 &= \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{ra}^2 \cdots \therefore R_2 = \frac{NR_4}{L} \\ K &= \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_{ra} \quad (8-64) \\ \therefore R_1 &= \frac{KR_4}{3\omega_{ra} - K}, \quad R_2 = \frac{NR_4}{L}, \quad R_3 = \frac{GNR_4}{L} \\ \omega_{ra} &> \frac{K}{3} \\ R_b &= Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{ra}}\end{aligned}$$

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、

$$\begin{aligned}\frac{R_3}{R_2} &= \frac{GN}{L} \quad \therefore R_3 = \frac{GN}{L} R_2 \\ \omega_{rb}^2 &= \frac{1}{C_b^2 R_b^2} \cdots \therefore \omega_{rb} = \frac{1}{C_b R_b} \\ \omega_{zb}^2 &= \frac{R_2}{C_b^2 R_b^2 R_4} = \frac{R_2}{R_4} \omega_{rb}^2 \cdots \therefore R_2 = \frac{LR_4}{N}\end{aligned}\tag{8-65}$$

$$\begin{aligned}M &= \frac{3R_1}{C_b R_b (R_1 + R_4)} = \frac{3R_1}{R_1 + R_4} \omega_{rb} \\ \therefore R_1 &= \frac{MR_4}{3\omega_{rb} - M}, \quad R_2 = \frac{LR_4}{N}, \quad R_3 = GR_4\end{aligned}$$

$$\omega_{rb} > \frac{M}{3}$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_{rb}}$$

**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。

$$\begin{aligned}H_m(\omega_p, s) &= \frac{1}{C_H \sigma} \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{\sqrt{\frac{L}{N}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{za}^2)}{s^2 + Ks + \omega_{ra}^2} \frac{\sqrt{\frac{N}{L}} \frac{x_v}{\sqrt{q_v}} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{s^2 + Ms + \omega_{rb}^2} \\ &= \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{B_w}{\sigma} s + \omega_c^2} \prod_{v=1}^{(m-1)/2} \frac{G(s^2 + \omega_{za}^2)}{(s^2 + Ks + \omega_{ra}^2)} \frac{G \frac{N}{L} (s^2 + \omega_{zb}^2)}{(s^2 + Ms + \omega_{rb}^2)}\end{aligned}\tag{7-55}$$

$$G = \frac{x_v}{\sqrt{(m-1)C_H \sigma}} \sqrt{\frac{L}{q_v N}}$$

**et2** の伝達関数は、

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

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

### 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、

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = G \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)}{kk} GR_6 \quad (8-71)$$

$$\omega_{za}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \therefore \omega_{za} = \frac{1}{C_b R_b} \quad (8-72)$$

$$\omega_{ra}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \frac{1+kr}{1+kd} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{za}^2$$

$$\therefore kr = \frac{L(1+kd)}{N} - 1 > \frac{L}{N} - 1 \text{ に対して、 } kd = \frac{N(1+kr)}{L} - 1 \quad (8-73)$$

$$K = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} = \frac{kd+kr+4-4kk}{1+kd} \omega_{za}$$

$$\therefore kk = \frac{kd+kr+4 - \frac{K(1+kd)}{\omega_{za}}}{4} \quad (8-74)$$

$$(8-73) \text{ を代入して、} kk > 1 \text{ より、} kr > \frac{(L-N)\omega_{za} + KN}{(L+N)\omega_{za} - KN} \quad (8-75)$$

従って、

$$kr > \max \left[ \left( \frac{L}{N} - 1 \right), \frac{(L-N)\omega_{za} + KN}{(L+N)\omega_{za} - KN} \right] \text{ に対して、}$$

$$kd = \frac{N(1+kr)}{L} - 1, \quad kk = \frac{kd + kr + 4 - \frac{K(1+kd)}{\omega_{za}}}{4}$$

$$R_1 = \frac{Z}{2}, \quad R_2 = \frac{2Z}{kr}, \quad R_3 = (kk - 1)R_5, \quad R_4 = \frac{(1+kd)}{kk} GR_6 \quad (8-76)$$

$$R_b = Z, \quad C_b = \frac{1}{Z\omega_c}, \quad C_1 = 2C_b, \quad C_2 = \frac{kdC_b}{2}$$

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、

$$\frac{kk}{1+kd} \frac{R_4}{R_6} = \frac{GN}{L} \dots \therefore R_4 = \frac{(1+kd)}{kk} \frac{GN}{L} R_6 \quad (8-77)$$

$$\omega_{zb}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \therefore \omega_{zb} = \frac{1}{C_b R_b} \quad (8-78)$$

$$\omega_{rb}^2 = \left(\frac{1}{C_b R_b}\right)^2 \frac{1+kr}{1+kd} = \frac{1+kr}{1+kd} \omega_{zb}^2$$

$$\therefore kd = \frac{L(1+kr)}{N} - 1 > \frac{L}{N} - 1 \text{ に対して、 } kr = \frac{N(1+kd)}{L} - 1 \quad (8-79)$$

$$M = \frac{kd+kr+4-4kk}{C_b R_b(1+kd)} = \frac{kd+kr+4-4kk}{1+kd} \omega_{zb}$$

$$kd+kr+4 - \frac{M(1+kd)}{\omega_{zb}}$$

$$\therefore kk = \frac{\quad}{4} \quad (8-80)$$

$$(8-79) \text{ を代入して、 } kk > 1 \text{ より、 } kd > \frac{(L-N)\omega_{zb} + K}{(L+N)\omega_{zb} - K} \quad (8-81)$$

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。

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

## バンドプロジェクト

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_q0
{
    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];
}
```

／＊  $\varepsilon^2 C^2 \left( \frac{s}{\omega_p} \right)^{2nin} \prod_v \left[ s^2 + (x_{zv} \omega_p)^2 \right]^2$  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, f d 0 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;    ww[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_fz0;
    cal_qz0;
    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_q0;
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

### 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

- 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

- 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

- LtAct

アクティブフィルタの設計と LTSpice 用の回路図作成

## 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

- [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

Vector で公開中のソフトとデータ

- [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**

- [HDPhotoTool \(HD フォトツール\)](#)

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