

アクティブフィルター

設計仕様と回路図

Ver.2025.09.07

Ver.2025.09.17

Ver.2025.09.18

Ver.2025.09.28

Ver.2025.10.07

Ver.2025.10.15

Ver.2025.10.22

Ver.2025.12.31

Ver.2026.01.25

Ver.2026.01.27

三浦 高志

目次

目次.....	1
はじめに	5
Introduction.....	6
注意 Caution.....	8
基本回路と伝達関数 Diagram of the basic circuit block	9
1 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 LP1	10
2 次のローパスフィルタ基本回路 LP2	11
BE フィルタ及び各種フィルタ用の基本回路 BE1.....	12
BE フィルタ及び各種フィルタ用の基本回路 BE2.....	13
設計仕様の入力方法 How to enter design specifications	14
バターワース・ローパスフィルタ Butterworth Low-Pass Filter.....	15
次数を入力する時 When entering the filter order.....	15
次数を入力しない時 When you do not enter the filter order	18
フィルタの伝達関数を確認する Check the filter transfer function	20
テキストファイルの関連付け Text file association	22
伝達関数の係数を確認する Check the transfer function coefficients	24
回路図を作成する Create a schematic.....	25
回路図の素子値を設定する Set the element values of the circuit diagram.....	27
回路図ファイルの関連付け Schematic File Association	30
準備が出来たので、回路図を確認します Now that we're ready, let's check the circuit diagram.	31
基本回路 LP2 を選択して回路図を作成した I selected the basic circuit LP2 and created the circuit diagram.....	36
急峻な減衰特性を設計する Design steep attenuation characteristics	38
$X_s=1.2$ で、 $F_s=1\text{KHz}$ の減衰量を 60dB 以上とする設計 Design to achieve attenuation of 60 dB or more at $F_s = 1 \text{ kHz}$ with $X_s = 1.2$	40
フィルタの次数と周波数ごとの減衰量 Filter order and attenuation for each frequency	42
チェビシェフ・ローパスフィルタ Chebyshev low-pass filter	45
次数を入力する時 When entering the filter order.....	45
回路図を作成する Create a schematic.....	47
$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $att_p = 0.1\text{dB}$	48
$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $att_p = 1\text{dB}$	48

次数を入力しない時 When you do not enter the filter order	49
急峻な減衰特性を設計する Design steep attenuation characteristics	51
次数を 32 次を設定して、設計を行う Set the degree to 32 and proceed with the design.....	52
フィルターの次数と周波数ごとの減衰量 Filter order and attenuation for each frequency	55
逆チェビシェフ・ローパスフィルタ Inverse Chebyshev low-pass filter	59
次数を入力する時 When entering the filter order.....	59
逆チェビシェフ・ローパスフィルタの回路図 Inverse Chebyshev low-pass filter circuit diagram.....	62
次数を入力しない時 When you do not enter the filter order	64
チェビシェフと逆チェビシェフの相違点 Difference between Chebyshev and Inverse Chebyshev.....	65
急峻な減衰特性を設計する Design steep attenuation characteristics	67
フィルターの次数と周波数ごとの減衰量 Filter order and attenuation for each frequency	69
楕円関数・ローパスフィルタ Elliptic Function Low-Pass Filter.....	73
次数を入力する時 When entering the filter order.....	73
楕円関数・ローパスフィルタの回路図 Elliptic function low-pass filter circuit diagram.....	76
次数を入力しない時 When you do not enter the filter order	78
急峻な減衰特性を設計する Design steep attenuation characteristics	79
$X_s=1.01$ で、 $F_s=1\text{kHz}$ の減衰量を 60dB 以上とする設計 Design to achieve attenuation of 60 dB or more at $F_s = 1\text{ kHz}$ with $X_s = 1.01$	81
$F_p = 1\text{ kHz}$ で $X_s = 1.03$ のとき、 F_s で 120 dB 以上の減衰を実現する設計 Design achieving attenuation of 120 dB or more at F_s , when $F_p = 1\text{ kHz}$ and $X_s = 1.03$..	83
R と C の素子値を全て E96 シリーズに近似する All R and C element values are approximated to the E96 series	85
1 段目と 2 段目を更に調整して、1kHz の減衰量を改善する Further adjust the first and second stages to improve the attenuation at 1kHz	87
1 段目から 3 段目を更に調整して、1kHz の減衰量を改善する Further adjust the first to third stages to improve the attenuation of 1kHz	89
フィルターの次数と周波数ごとの減衰量 Filter order and attenuation for each frequency	92
減衰特性の比較 Comparison of damping characteristics.....	96
比較例 1 Comparative example 1.....	96

バターワースフィルタの場合 Butterworth filter case	96
バターワースの結果 Butterworth Results	98
オペアンプを AD8648 に変更した結果 Results of changing the op-amp to AD8648	99
参考実験	101
参考実験の結果	102
チェビシェフフィルタの場合 In the case of the Chebyshev filter	103
チェビシェフの結果 Chebyshev's results	104
オペアンプを AD8648 に変更した結果 Results of changing the op-amp to AD8648	105
逆チェビシェフフィルタの場合 In the case of the inverse Chebyshev filter	106
逆チェビシェフの結果 Reverse Chebyshev's Result	107
楕円関数フィルタの場合 In the case of elliptic function filters	108
楕円関数の結果 Results of Elliptic Functions	109
比較例 2 Comparative Example 2	110
バターワースフィルタの場合 In the case of the Butterworth filter	110
バターワースの結果 Butterworth's results	111
チェビシェフフィルタの場合 In the case of the Chebyshev filter	112
チェビシェフの結果 Chebyshev's result	114
オペアンプを AD8648 に変更した結果 Results of changing the op-amp to AD8648	115
逆チェビシェフフィルタの場合 In the case of the inverse Chebyshev filter	117
逆チェビシェフの結果 Reverse Chebyshev's Result	119
逆チェビシェフフィルタの場合 別の設計方法 For Inverse Chebyshev Filters: An Alternative Design Method	120
逆チェビシェフの結果 別の設計方法 Reverse Chebyshev Results: An Alternative Design Method	121
逆チェビシェフ・フィルタの場合 さらに別の設計方法 For the inverse Chebyshev filter, another design method	122
逆チェビシェフの結果 さらに別の設計方法 Reverse Chebyshev Results: Another Design Method	123
楕円関数フィルタの場合 In the case of elliptic function filters	124
楕円関数の結果 Results of Elliptic Functions	126
オペアンプを AD8648 に変更した結果 Results of changing the op-amp to AD8648	127
結果のまとめ Summary of Results	129

Vector で公開中のソフトとデータ Software and data available on Vector.....	130
--	-----

はじめに

はじめに

「アクティブフィルタ 設計仕様と回路図」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。

本書では、現在 Vector より公開中の「LtAct」または「ActiveFilter-Design-Schematics」を利用してアクティブフィルタを設計してその回路図を作成する場合の「設計仕様」の入力方法と「LtAct」によって生成される「回路図」及びその「伝達関数」について説明いたします。

上記ソフトウェアのダウンロードは下記よりお願い致します。

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

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

本書では、ローパスフィルタの設計仕様と回路図について説明いたします。

設計仕様の入力方法については、(1) カットオフ周波数とフィルタの次数を重視してその他はあまり拘らない方法と (2) カットオフ周波数 F_c を越える周波数 F_s 以上の周波数で減衰量 $atts$ 以上を確保する事を重視してフィルタの次数はソフトウェア「LtAct」に決めさせるやり方について説明します。

本書では、(1) は「次数を入力する時」、(2) は「次数を入力しない時」として説明しています。

方法 (1) では、カットオフ周波数 F_c の X_s 倍の周波数 F_s における減衰量を確認するために、パラメータ X_s を入力しますが、これはフィルタの設計仕様ではありません。

方法 (2) では、カットオフ周波数 F_c の X_s 倍の周波数 F_s における減衰量が $atts$ 以上となるフィルタを設計するためにパラメータ X_s を入力しますが、これはフィルタの設計仕様です。

そして、周波数 F_s 以上では減衰量が $atts$ 以上となるので、 $atts$ を最低減衰量と呼びます。

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。

伝達関数の係数を回路図の素子値に変換する数式を知りたい場合は、公開中の文書「アクティブフィルタの設計と合成」を参照して下さい。

<https://www.vector.co.jp/soft/data/edu/se527456.html>

三浦 高志 2025/09/07

Introduction

Thank you for downloading "Active Filter Design Specifications and Circuit Diagram."

This document explains how to input "design specifications" when designing an active filter and creating its circuit diagram using "LtAct" or "ActiveFilter-Design-Schematics," both of which are currently available from Vector, as well as the "circuit diagram" and its "transfer function" generated by "LtAct."

Please download the above software from the link below.

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

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

This document explains the design specifications and circuit diagrams of low-pass filters.

Regarding how to input design specifications, we will explain two methods: (1) a method that focuses on the cutoff frequency and filter order, but does not pay much attention to other factors, and (2) a method that focuses on ensuring an attenuation of $atts$ or more at frequencies F_s or higher that exceed the cutoff frequency F_c , and lets the software "LtAct" determine the filter order.

In this book, (1) is explained as "when entering the order" and (2) as "when not entering the order."

In method (1), the parameter X_s is entered to check the attenuation at frequency F_s , which is X_s times the cutoff frequency F_c . However, this is not a design specification for the filter.

In method (2), you enter the parameter X_s to design a filter whose attenuation at a frequency F_s that is X_s times the cutoff frequency F_c is greater than or equal to $atts$. This is the filter design specification. And since the attenuation is greater than or equal to $atts$ at frequencies above F_s , $atts$ is called the minimum attenuation.

Introduction

If you need more detailed explanations, please refer to the documents included with the released software, such as "Active Filter Design.pdf" and "LtAct Operation Manual.pdf."

If you want to know the formulas for converting transfer function coefficients into circuit diagram element values, please refer to the published document "Design and Synthesis of Active Filters."

<https://www.vector.co.jp/soft/data/edu/se527456.html>

Takashi Miura 2025/09/07

注意 Caution

注意 Caution

「LTSpice」を使用して、「LtAct」で作成した回路図をシミュレーションする前に、
「LtAct」をインストールしたフォルダの「OP のテストデータ」の「asy-修正後」の asy ファイル
を全て「LTSpice」をインストールしたフォルダ、
例えば C:\Users\miura\Documents\LTspiceXVII\lib\sym\OpAmps
にコピーしてください。

何か不都合がある時は、「asy-original」の asy を全て
C:\Users\miura\Documents\LTspiceXVII\lib\sym\OpAmps
にコピーして元の状態に戻してください。

「LTSpice」の操作については、Vector で公開中の「LTSpice 操作入門」ver.1.2 で説明しています
ので参照して下さい。

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

Before simulating the circuit diagram created in LtAct using LTSpice,
copy all asy files from the “OP Test Data” folder within the LtAct installation directory
to the LTSpice installation directory,
for example: C:\Users\miura\Documents\LTspiceXVII\lib\sym\OpAmps.

If you encounter any issues, copy all files named “asy-original” to
C:\Users\miura\Documents\LTspiceXVII\lib\sym\OpAmps
to restore the original state.

For information on operating LTSpice, please refer to the “LTSpice Operation Guide” ver.1.2
published on Vector.

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

基本回路と伝達関数 Diagram of the basic circuit block

1 次のローパスフィルタ基本回路 lp1

1st order low-pass filter basic circuit lp1

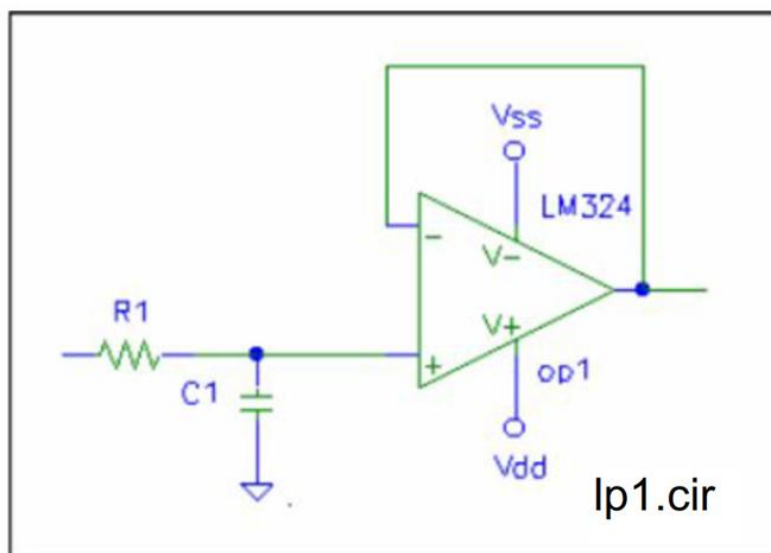


図 2-1 1 次のローパスフィルタ基本回路 1 lp1_1.cir

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

lp1_cir の伝達関数

transfer function of lp1.cir

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

奇数次数の各種ローパスフィルタに使用される。

Used for various low-pass filters of odd order.

2 次のローパスフィルタ基本回路 LP1

2nd order low-pass filter basic circuit LP1

バターワースまたはチェビシェフローパスフィルタで利用される基本回路 LP1 です。

This is the basic circuit LP1 used in Butterworth or Chebyshev low-pass filters.

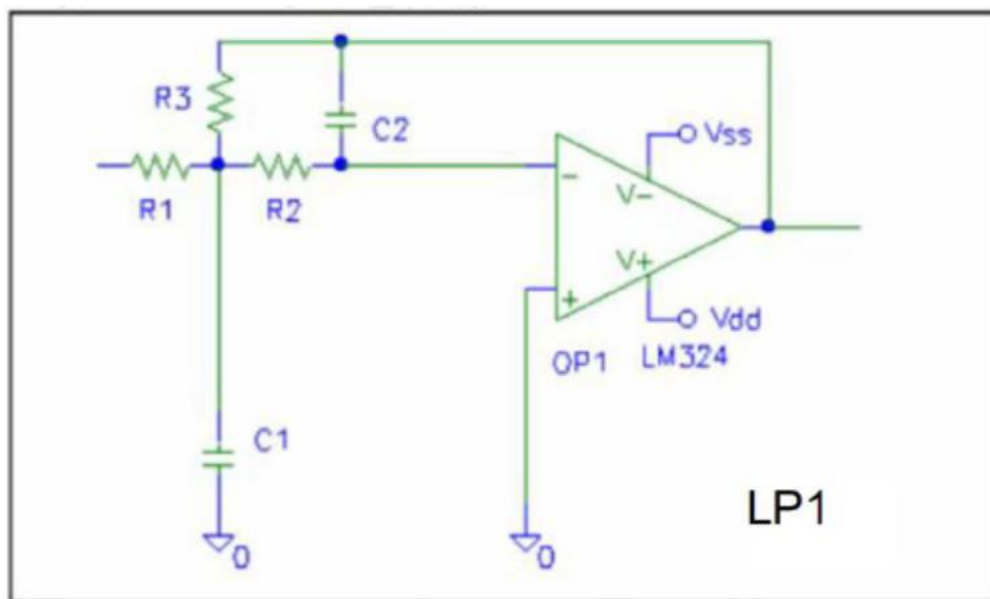


図 2-3 2 次のローパスフィルタ基本回路 LP1 (lp1_2.cir)

Figure 2-3 2nd order low-pass filter basic circuit LP1 (lp1_2.cir)

LP1 の伝達関数

Transfer function of LP1

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

$C_2 = C, C_1 = m \cdot C, R_1 = R, R_2 = k \cdot R, R_3 = R$, $k = 1, m = 9 \cdot Q_k^2$ に設定する。

Set $C_2 = C, C_1 = m \cdot C, R_1 = R, R_2 = k \cdot R, R_3 = R, k = 1, m = 9 \cdot Q_k^2$.

2 次のローパスフィルタ基本回路 LP2

2nd order low-pass filter basic circuit LP2

バターワースまたはチェビシェフローパスフィルタで利用される基本回路 LP2 です。

This is the basic circuit LP2 used in Butterworth or Chebyshev low-pass filters.

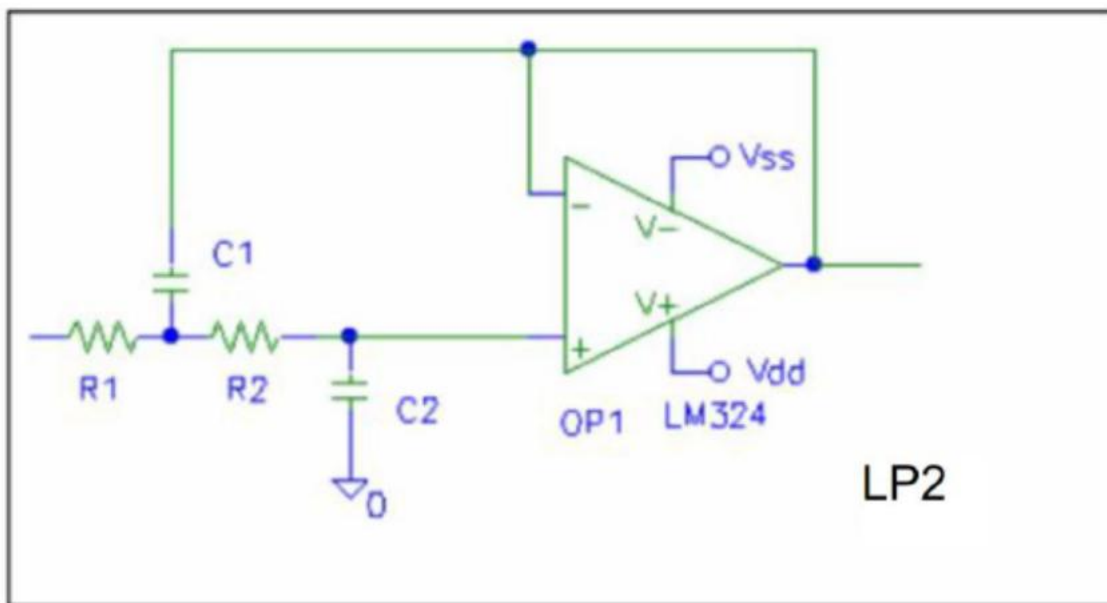


図 2-4 2 次のローパスフィルタ基本回路 LP2 (lpat2_2.cir)

Figure 2-4 Quadratic function low-pass filter basic circuit LP2 (lpat2_2.cir)

LP2 の伝達関数

Transfer function of LP2

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

$C_1 = mC, C_2 = C, R_1 = R, R_2 = kR, k = 1, m = 4 \cdot Q_k^2$ に設定する。

Set $C_1 = mC, C_2 = C, R_1 = R, R_2 = kR, k = 1, m = 4 \cdot Q_k^2$.

BE1

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

逆チェビシェフまたは楕円関数ローパスフィルタで利用される基本回路 LP3 です。

This is the basic circuit LP3 used in inverse Chebyshev or elliptic function low-pass filters.

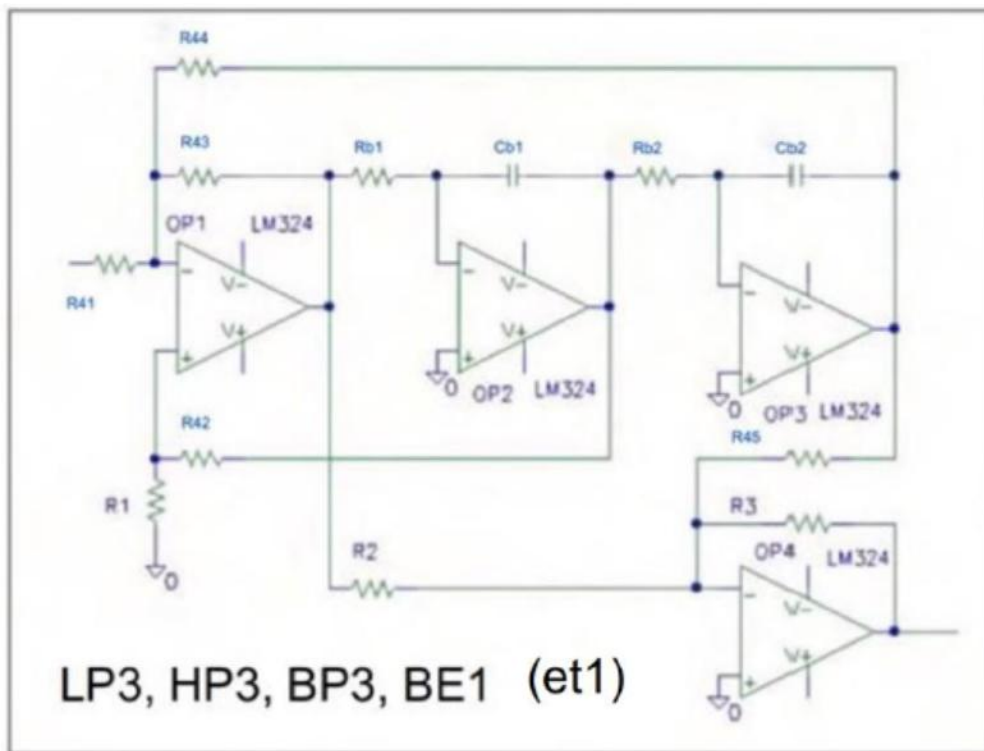


図 2-5 2 次のローパスフィルタその他で利用される基本回路 (lpet1_2.cir)

Figure 2-5 Basic circuit used in secondary low-pass filters and others (lpet1_2.cir)

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

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

et1(LP3、HP3、BP3、BE1)の伝達関数

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

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

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

$R = R_{41} \sim R_{45}$ are optional. In version 3.30 of "LtAct", it is set to 10K.

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

逆チェビシェフまたは楕円関数ローパスフィルタで利用される基本回路 LP4 です。

This is the basic circuit LP4 used in inverse Chebyshev or elliptic function low-pass filters.

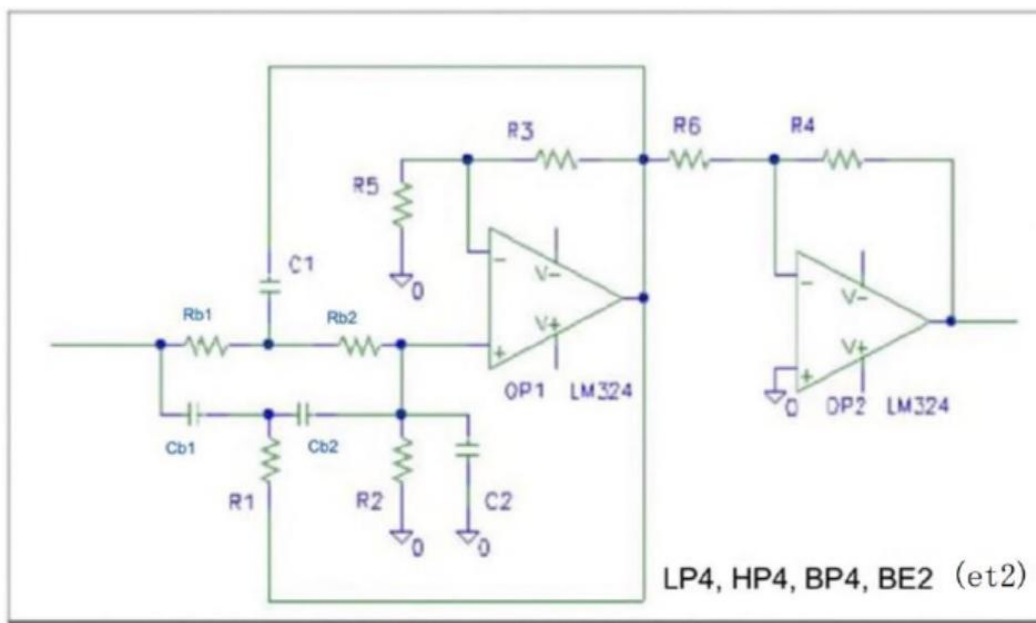


図 2-6 2 次のローパスフィルタその他で利用される基本回路 (lpet2_2.cir)

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)

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

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

R_5 と R_6 は 10K に固定されている。

R_5 and R_6 are fixed at 10K.

設計仕様の入力方法 How to enter design specifications

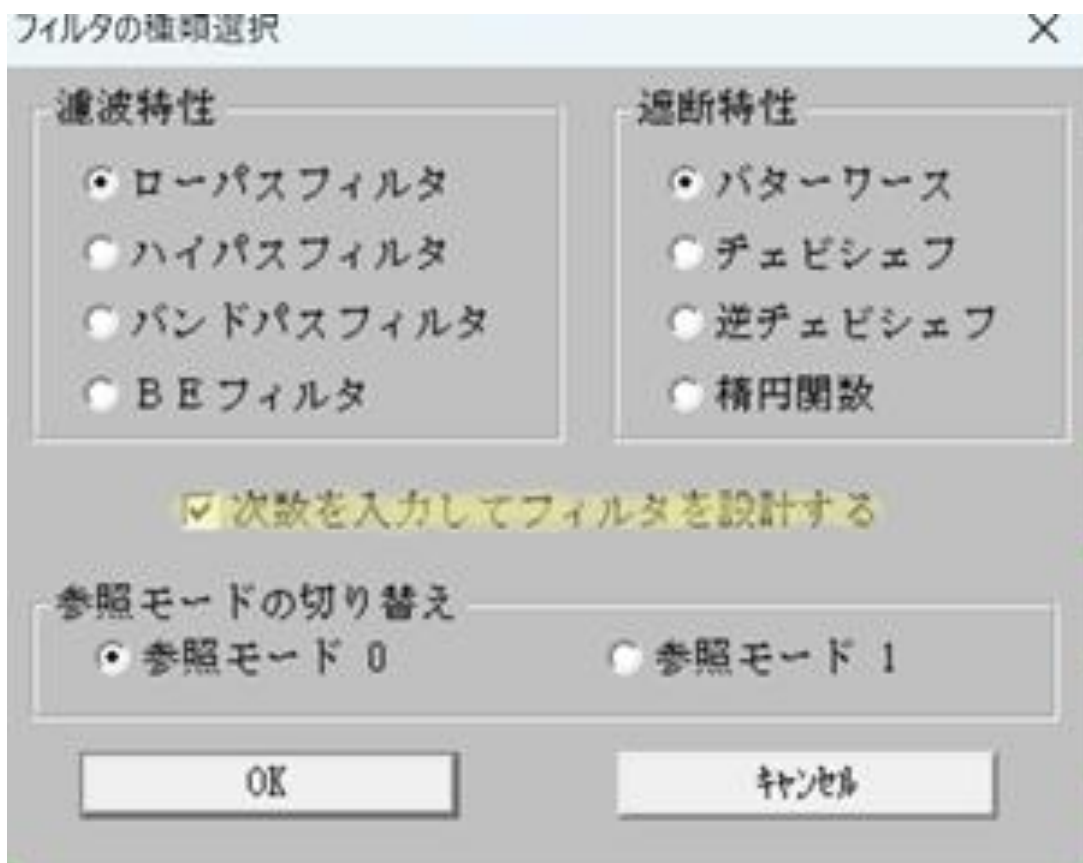
フィルタの設計仕様を入力するには、ソフトウェア「LtAct」のウィンドウ上部から「フィルタの種類選択」を押します。

To enter the filter design specifications, click "フィルタの種類選択 Select Filter Type" at the top of the "LtAct" software window.



次のウィンドウが表示されます。

The following window will appear.



「濾波特性」と「遮断特性」を選択してチェックします。

Select and check "濾波特性 Filtering characteristics" and "遮断特性 Cutoff characteristics".

「次数を入力してフィルタを設計する」をチェックして「OK」を押します。

Check "次数を入力してフィルタを設計する Enter the order and design the filter" and click "OK".

Butterworth Low-Pass Filter

バターワース・ローパスフィルタ Butterworth Low-Pass Filter

次数を入力する時 When entering the filter order

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

設計するフィルタの次数 m ($m \leq 50$) 6

カットオフ周波数 F_c 1 KHz

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

OK Cancel

「1 行目 m 」にフィルタの次数 m を入力する。 Enter the filter order m in "Line 1 m ".

「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。

Enter the cutoff frequency F_c in "Line 2 F_c ". Change the frequency unit if necessary.

「3 行目 X_s 」に減衰量を確認する周波数 F_s と F_c の比 X_s ($=F_s / F_c$) を入力する。

Enter the ratio X_s ($=F_s / F_c$) between the frequencies F_s and F_c for which you want to check the attenuation in "Line 3 X_s ".

「最低減衰量に達する周波数 F_s 」は「減衰量を確認する周波数 F_s 」の誤りです。

"The frequency F_s at which the minimum attenuation is reached" should be "The frequency F_s at which the attenuation is checked."

注意：ここで設計に必要なパラメータは次数 m とカットオフ周波数 F_c の 2 個だけです。

Note: The only two parameters required for the design here are the filter order m and the cutoff frequency F_c .

X_s はカットオフ周波数 F_c の X_s 倍の周波数で減衰量がどれくらいになるかを確認するため、設計の仕様ではありません。 X_s is used to confirm the amount of attenuation at a frequency that is X_s times the cutoff frequency F_c , and is not a design specification.

m と F_c を変更しなければ、 X_s を変更しても作成される伝達関数は同一になります。

If m and F_c are not changed, the transfer function created will be the same even if X_s is changed.

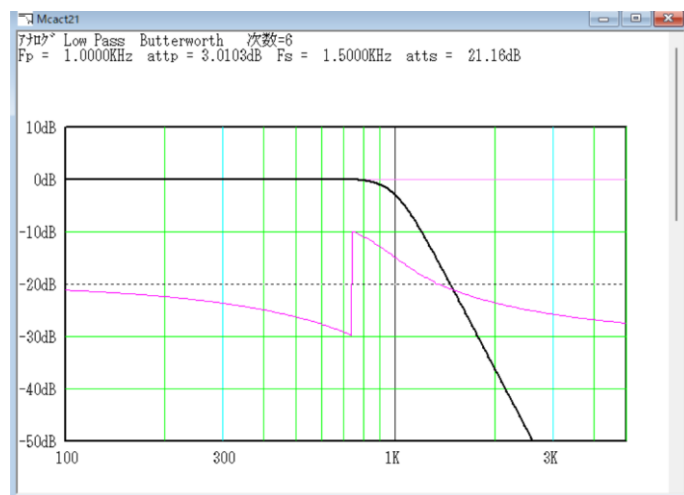
設計仕様の入力後「OK」を押すと、ソフトウェア「LtAct」は設計仕様を満たすフィルタの伝達関数を計算して、伝達関数からローパスフィルタの周波数特性のグラフと周波数 $F_s = X_s * F_p$ における減衰量 $atts$ などを表示して、フィルタの設計を完了します。

After entering the design specifications, click "OK" and the software "LtAct" will calculate the transfer function of the filter that meets the design specifications. From the transfer function, it will display a graph of the low-pass filter's frequency characteristics and the attenuation amount $atts$ at the frequency $F_s = X_s * F_p$, completing the filter design.

Butterworth Low-Pass Filter

$m=6$, $F_c=1$ KHz, $X_s=1.5$ の場合、 $F_s=1.5$ KHz における減衰量は 21.16dB になります。

When $m=6$, $F_c=1$ KHz, and $X_s=1.5$, the attenuation at $F_s=1.5$ KHz is 21.16dB.

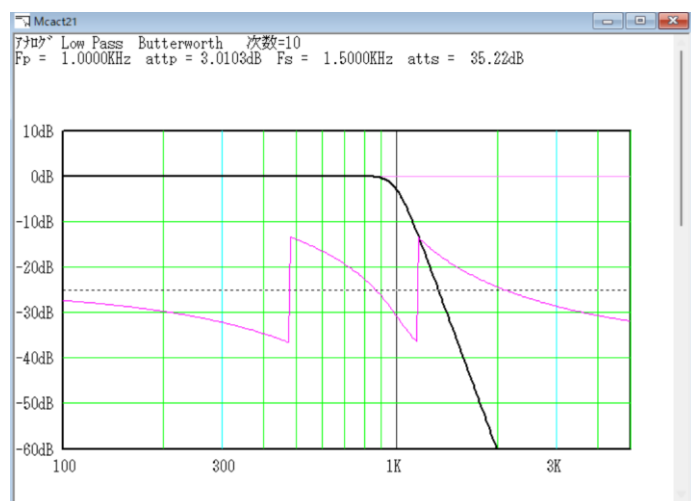


もしも、 $F_c=1$ KHz, $X_s=1.5$ と入力して、 $F_s=1.5$ KHz における減衰量が 60dB 以上のフィルターを設計したい場合には、フィルタの次数を高くする必要があります。

If you input $F_c=1$ KHz, $X_s=1.5$ and want to design a filter with an attenuation of 60 dB or more at $F_s=1.5$ KHz, you need to increase the order of the filter.

例えば、 $m=10$, $F_c=1$ KHz, $X_s=1.5$ と入力して「OK」を押すと、以下のグラフが表示されて減衰量は 35.22dB に増加しますが、まだ減衰量が足りないことが分かります。

For example, if you enter $m=10$, $F_c=1$ KHz, $X_s=1.5$ and click "OK," the following graph will be displayed, showing that the attenuation has increased to 35.22 dB, but this is still insufficient.



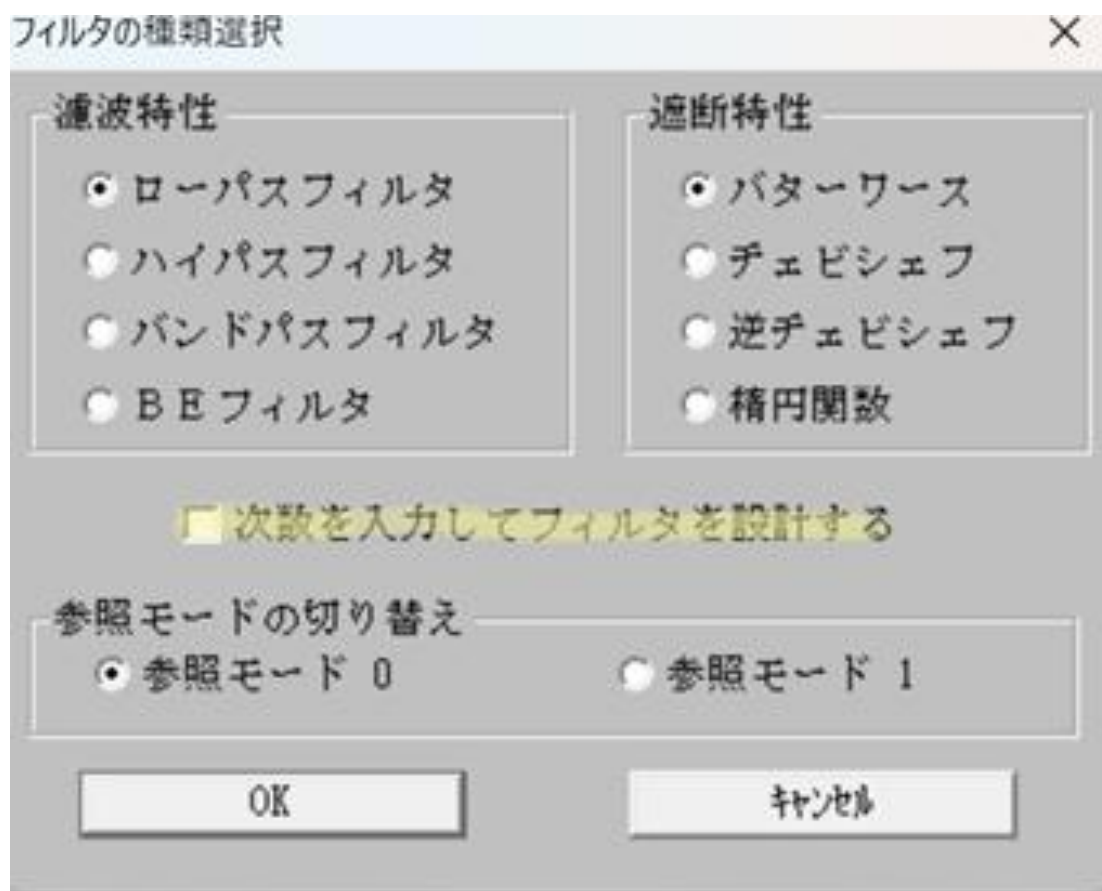
Butterworth Low-Pass Filter

さらに次数を増加して確認するとやがて条件を満足する次数が分かりますが、必要な次数を 1 回で求める方法があります。次の「次数を入力しない」パラメータの入力方法を用います。

If you continue to increase the order and check, you will eventually find the order that satisfies the conditions, but there is a way to find the required order in one go. Use the following parameter input method that does not require you to enter an order.

「フィルタの種類選択」をクリックします。

Click "フィルタの種類選択 Select Filter Type".



「次数を入力してフィルタを設計する」のチェックを外して「OK」を押します。

Uncheck "次数を入力してフィルタを設計する Enter filter order and design filter" and click "OK".

Butterworth Low-Pass Filter

次数を入力しない時 When you do not enter the filter order

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 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

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。

Enter the cutoff frequency or attenuation band frequency F_p in "Line 1 F_p ." Change the frequency units if necessary.

「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。

Enter the attenuation $attp$ (dB) for the F_p entered above in "Line 2 $attp$." In Butterworth, the cutoff frequency $attp$ is pre-set to 3.01dB, but if you change $attp$ to 6, for example, F_p will become the frequency in the attenuation band.

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

Enter the ratio X_s ($=F_s / F_p$) between the frequencies F_s and F_p for which you want to check the attenuation in "Line 3 X_s ".

「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。

Enter the minimum attenuation $atts$ at frequency F_s in "Line 4 $atts$."

注意：この場合は、設計に必要なパラメータはカットオフ周波数付近の周波数 F_p 、 F_p における減衰量、周波数 F_s と F_p の比 X_s 、および最低減衰量 $atts$ の 4 個に増加します。

バターワース以外のフィルター形式でも必要なパラメータは 4 個に増加します。

Note: In this case, the parameters required for design increase to four: the frequency near the cutoff frequency F_p , the attenuation at F_p , the ratio X_s of the frequency F_s to F_p , and the minimum attenuation $atts$.

Filter types other than Butterworth also increase the required parameters to four.

次数を入力しない時 When you do not enter the filter order

Butterworth Low-Pass Filter

バターワースフィルタの場合、 $F_p = F_c$ (カットオフ周波数) の場合には、**attp** は自動的に表示される 3.01029 のままにしておきます。

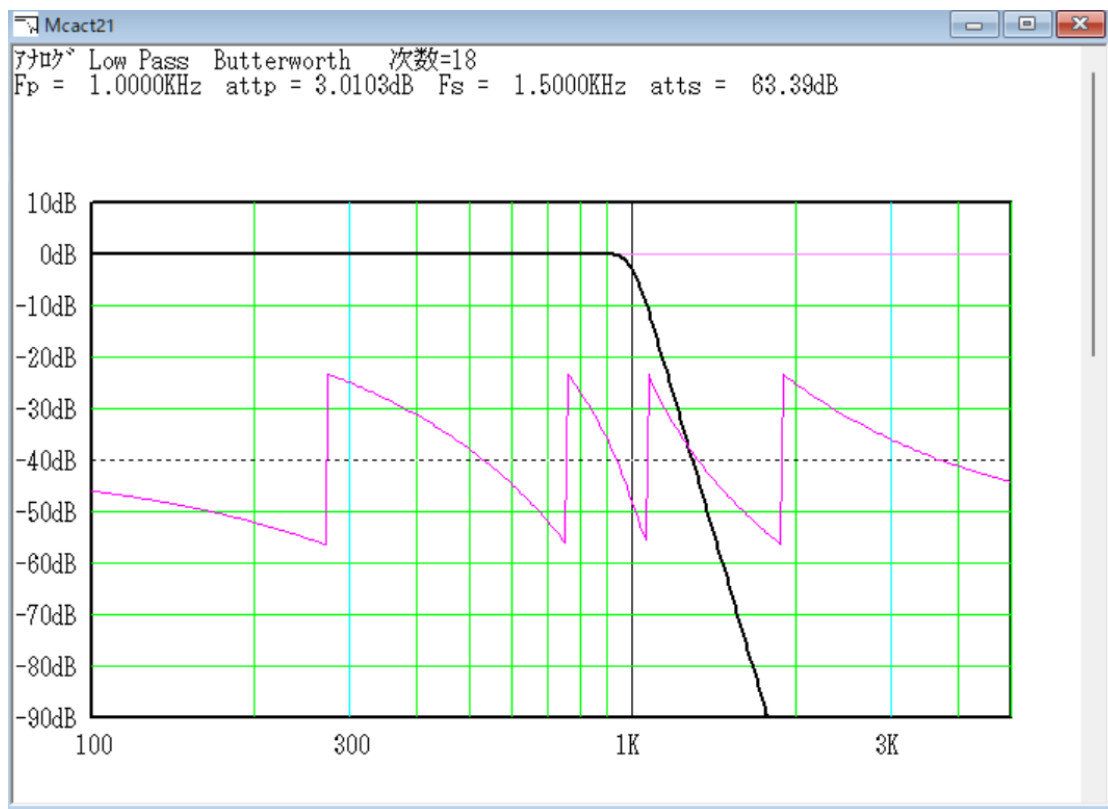
For a Butterworth filter, if $F_p = F_c$ (cutoff frequency), leave **attp** at 3.01029, which is automatically displayed.

上記の入力後「OK」を押すと、ソフトウェア「LtAct」が必要最低限の次数を計算して周波数 F_p の減衰量が **attp** で、周波数 $F_s = X_s * F_p$ における減衰量が **atts** を越える最低次数の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ます。

After entering the above information, click "OK" and the software "LtAct" will calculate the minimum required order and design a low-pass filter with the minimum order such that the attenuation at frequency F_p is **attp** and the attenuation at frequency $F_s = X_s * F_p$ exceeds **atts**. The software will then display its frequency characteristics.

上記のパラメータではフィルタの次数は 18 次に決定され、周波数 $F_s = X_s * F_p$ における減衰量は $63.39\text{dB} > 60\text{dB}$ になります。

With the above parameters, the filter order is determined to be 18, and the attenuation at the frequency $F_s = X_s * F_p$ is $63.39\text{dB} > 60\text{dB}$.

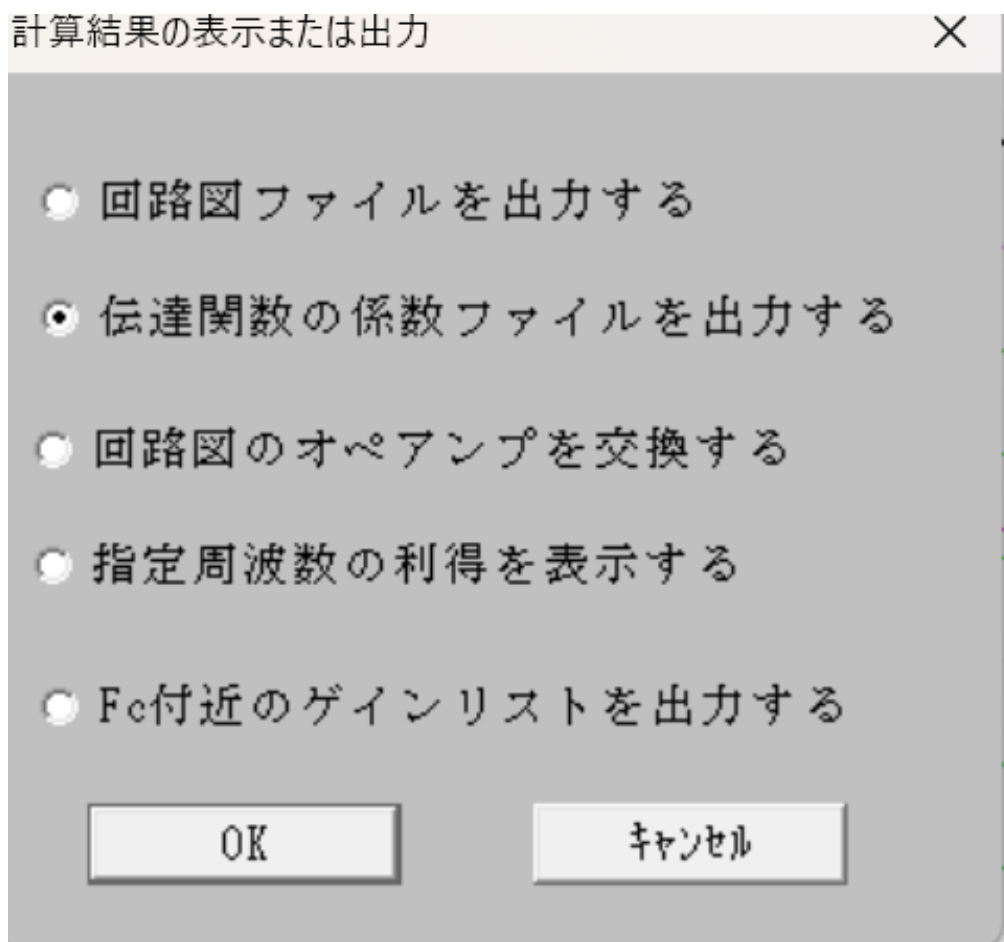


Butterworth Low-Pass Filter

フィルタの伝達関数を確認する Check the filter transfer function

「次数を入力する時」に入力したパラメータ ($m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $X_s=1.5$) から計算されたフィルタの伝達関数を確認するには、ソフトウェア「LtAct」のウィンドウ上部から「表示・出力」を押します。

To check the transfer function of the filter calculated from the parameters entered in "Entering the Order" ($m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $X_s=1.5$), click "表示・出力 Display/Output" at the top of the "LtAct" software window.



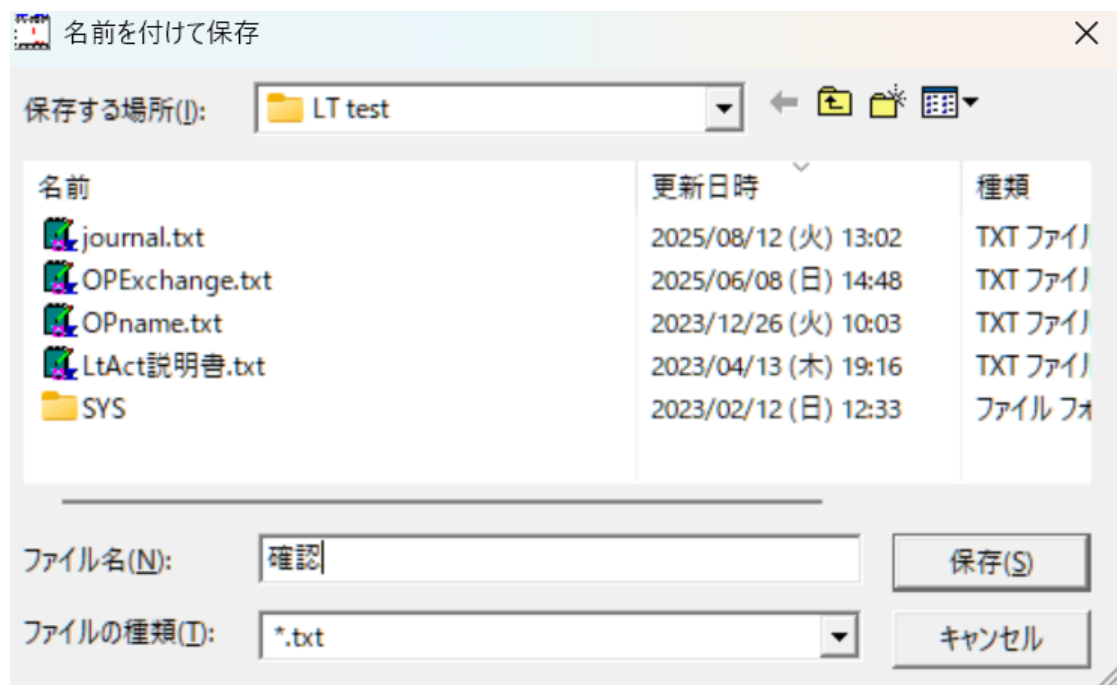
「伝達関数の係数ファイルを出力する」をチェックして「OK」を押します。

Check "伝達関数の係数ファイルを出力する Output transfer function coefficient file" and press "OK".

Butterworth Low-Pass Filter

$m=6$, $F_c=1$ KHz, $X_s=1.5$ の場合の伝達関数の係数ファイルを保存します。

Save the coefficient file for the transfer function where $m=6$, $F_c=1$ KHz, and $X_s=1.5$.



伝達関数の係数ファイルの名前を入力して「OK」を押します。

Enter the name of the transfer function coefficient file and press "OK".

テキストファイルの関連付け Text file association

「LtAct」の画面から、「ファイル」→「データファイルを開く」によって、「test.txt」のように拡張子が「.txt」のファイルを表示できるようにするために、拡張子の関連付けを行います。

From the "LtAct" screen, you can associate the file extension with ".txt" by selecting "File" -> "Open Data File" so that you can display files with the extension ".txt", such as "test.txt".

エクスプローラでテキストファイルが保存されているフォルダを開いて、テキストファイルを右クリックします。

In Windows Explorer, open the folder containing the text file and right-click on it.



Butterworth Low-Pass Filter

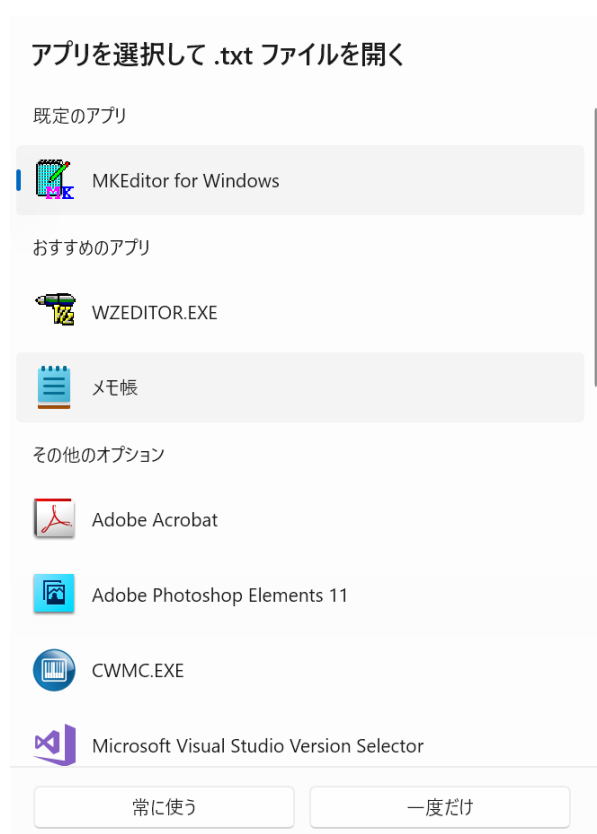
「プログラムから開く」にカーソルを移動します。

Move the cursor to "Open with."



別のプログラムを希望する時は「別のプログラムを選択」をクリックします。

If you would like to use a different program, click "Select another program."



「メモ帳」などを左クリックします。

Butterworth Low-Pass Filter

伝達関数の係数を確認する Check the transfer function coefficients

「ファイル」→「データファイルを開く」をクリックしてフォルダを選択して、伝達関数の係数ファイル「確認.txt」を選択して「開く」を押します。

Click "File" → "Open Data File", select a folder, select the transfer function coefficient file "確認.txt Confirm.txt", and click "Open".

確認.txt の内容 Contents of "確認..txt"

+++++++ 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=6

Fp = 1.0000KHz attp = 3.0103dB Fs = 1.5000KHz atts = 21.16dB

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	3.2524K	39.4784Meg	0	0	39.4784Meg
Fc= 1.0000KHz Fc ゲイン= 5.7195 dB Q = 1.9319 GB 積=193.1852KHz					
2	8.8858K	39.4784Meg	0	0	39.4784Meg
Fc= 1.0000KHz Fc ゲイン= - 3.0103 dB Q = 0.7071 GB 積= 70.7107KHz					
3	12.1382K	39.4784Meg	0	0	39.4784Meg
Fc= 1.0000KHz Fc ゲイン= - 5.7195 dB Q = 0.5176 GB 積= 51.7638KHz					

3 個の 2 次ローパスフィルタの伝達関数の係数が確認できます。

基本ブロックごとに伝達関数の係数が記録され、次の行にはそのブロックのカットオフ周波数 Fc、Fc におけるゲイン、ブロックの Q 値そして OP アンプに求められる GB 積が記録されています。

You can check the transfer function coefficients of the three second-order low-pass filters.

For each basic block, the transfer function coefficients are recorded, and the next line records the block's cutoff frequency Fc, the gain at Fc, the block's Q value, and the required GB product of the op amp.

従って、伝達関数は以下の式が得られます。Therefore, the transfer function is as follows:

$$H_6(\omega_{ck}, s) = \frac{39.4784Meg}{s^2 + 3.2524K \cdot s + 39.4784Meg} \cdot \frac{39.4784Meg}{s^2 + 8.8858K \cdot s + 39.4784Meg} \cdot \frac{39.4784Meg}{s^2 + 12.1382K \cdot s + 39.4784Meg}$$

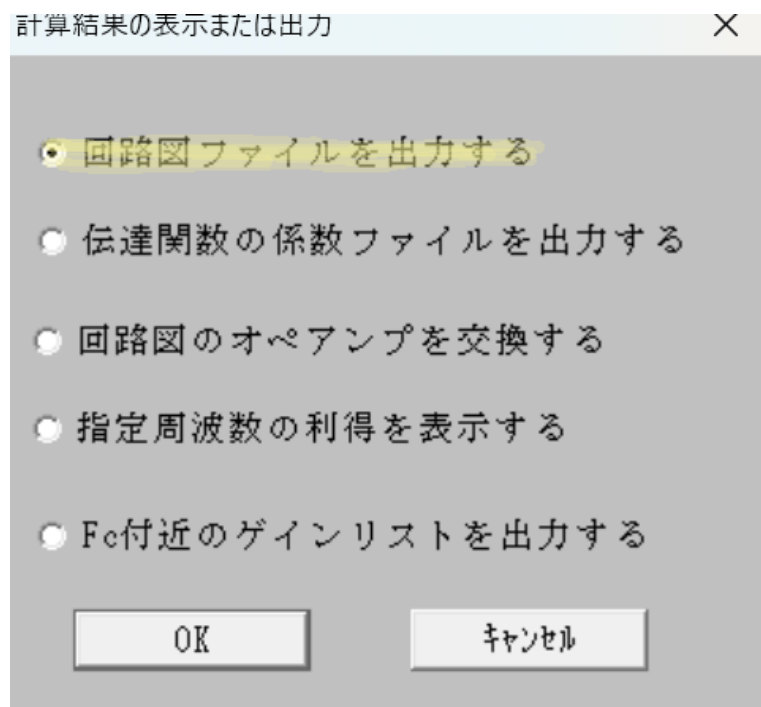
フィルタの伝達関数を確認する Check the filter transfer function

Butterworth Low-Pass Filter

回路図を作成する Create a schematic

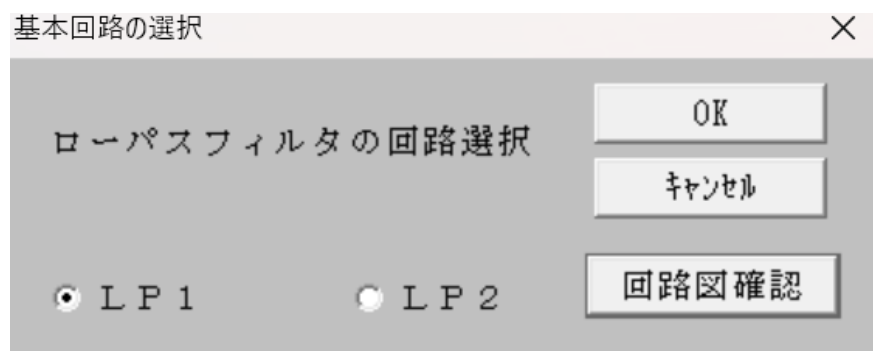
伝達関数の係数から回路図を作成するには、ソフトウェア「LtAct」のウィンドウ上部から「表示・出力」を押します。

To create a circuit diagram from the transfer function coefficients, click "表示・出力 Display/Output" at the top of the "LtAct" software window.



「回路図ファイルを出力する」をチェックして「OK」を押します。

Check "回路図ファイルを出力する Export schematic file" and press "OK".



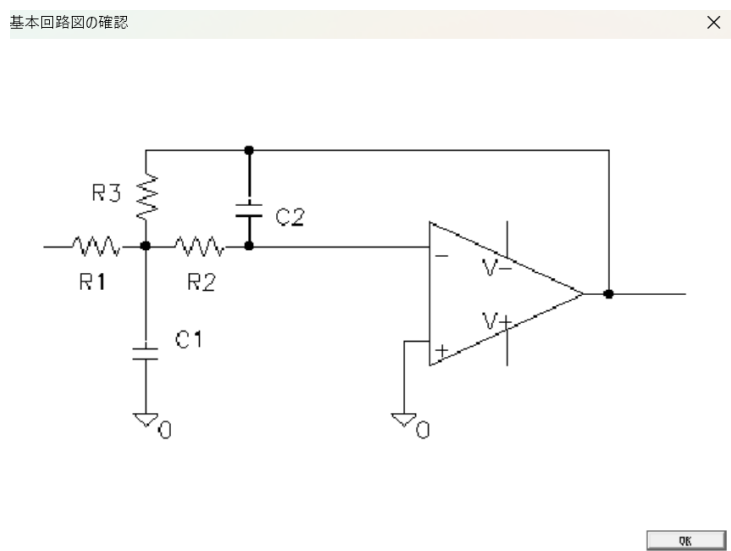
基本回路図は LP1 または LP2 を選択できます。

The basic circuit diagram can be selected as LP1 or LP2.

Butterworth Low-Pass Filter

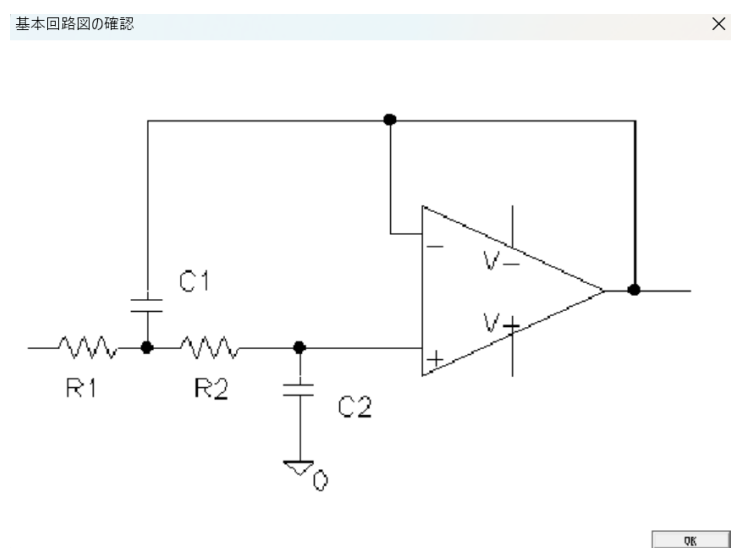
LP1 をチェックして「回路図確認」を押すと、基本回路図 LP1 が表示されます。

Check LP1 and press "回路図確認 Check Circuit Diagram" to display the basic circuit diagram LP1.



LP2 をチェックして「回路図確認」を押すと、基本回路図 LP2 が表示されます。

Check LP2 and press "回路図確認 Check Circuit Diagram" to display the basic circuit diagram LP2.



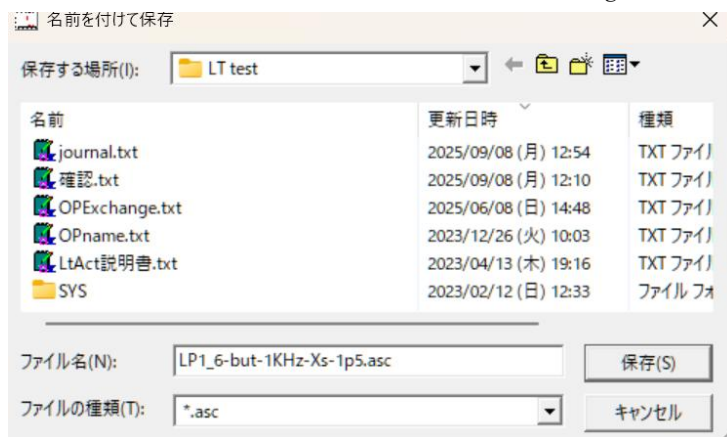
基本回路図を選択したら、「OK」を押します。

Once you have selected the basic schematic, press "OK".

回路図の素子値を設定する Set the element values of the circuit diagram.

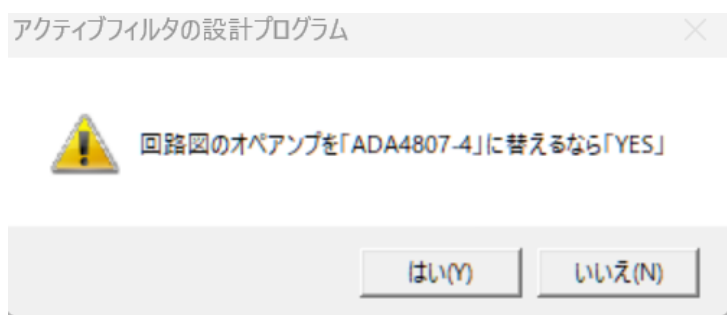
基本回路 LP1 を選択して回路図を作成する。

Select the basic circuit LP1 and create a circuit diagram.



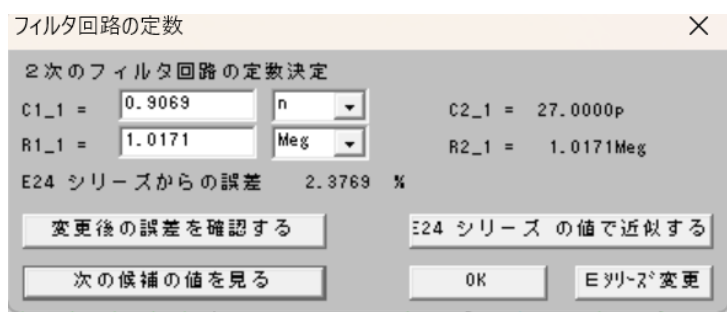
回路図のファイル名を入力して、「OK」を押します。

Enter a file name for the schematic and press "OK".



回路図のオペアンプを決定します。ここでは「はい」を押します。

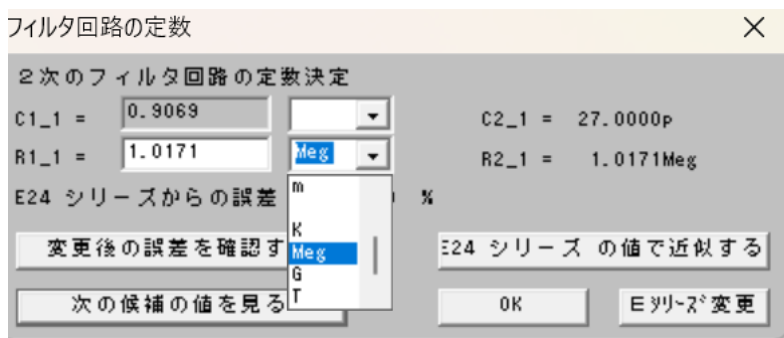
Determine the op-amp in the circuit diagram. Click "Yes" here.



R1_1 を 1 K に変更します。R1_1 の単位の「矢印」を押します。

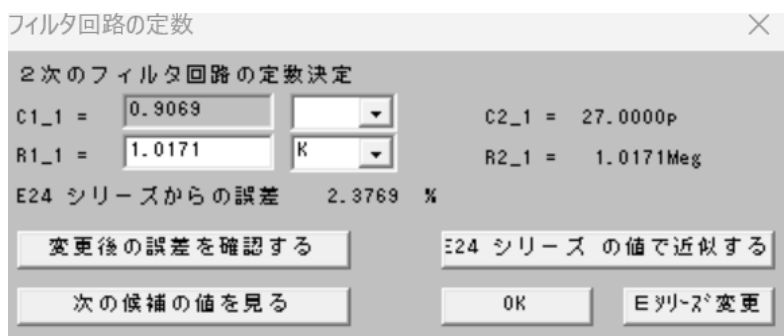
Change R1_1 to 1 K. Press the unit "arrow" for R1_1.

Butterworth Low-Pass Filter



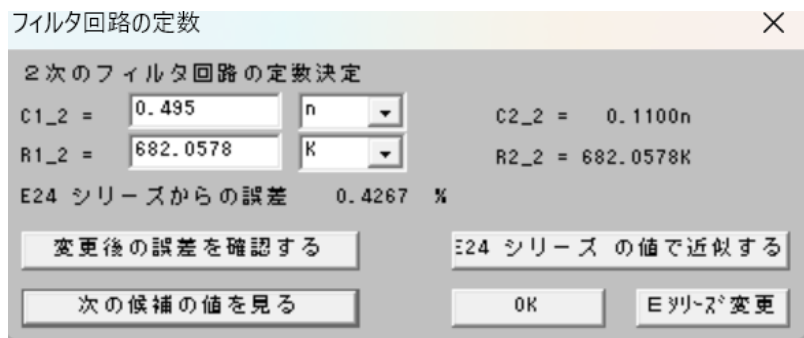
「K」を押します。

Press "K".



「1.0171」を選択して、「1」を入力して「OK」を押します。もう一度「OK」を押します。

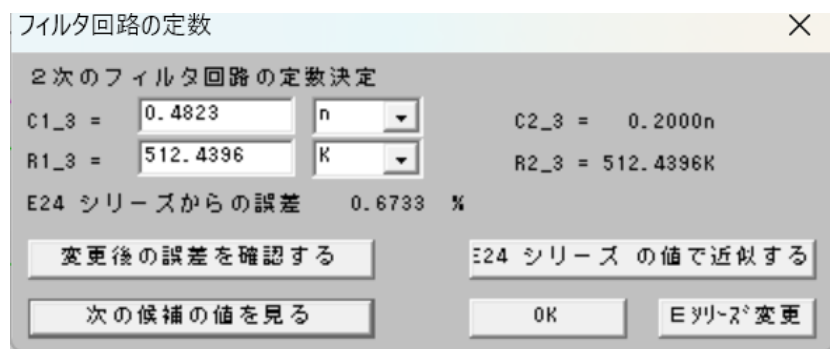
Select "1.0171", enter "1", and press "OK". Press "OK" again.



R1_2 を同様に 1 K に変更します。「682.0578」を選択して「1」を入力して「OK」を押します。もう一度「OK」を押します。

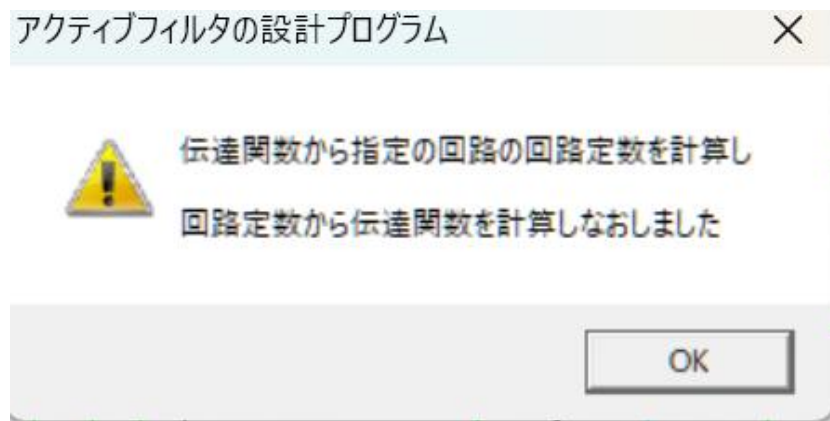
Change R1_2 to 1 K in the same way. Select "682.0578", enter "1", and press "OK". Press "OK" again.

Butterworth Low-Pass Filter



R1_3 を同様にして 1 K に変更すると、素子値の設定が完了します。

Similarly, change R1_3 to 1 K, and the element value setting is complete.



回路図が完成しました。

The circuit diagram is complete.

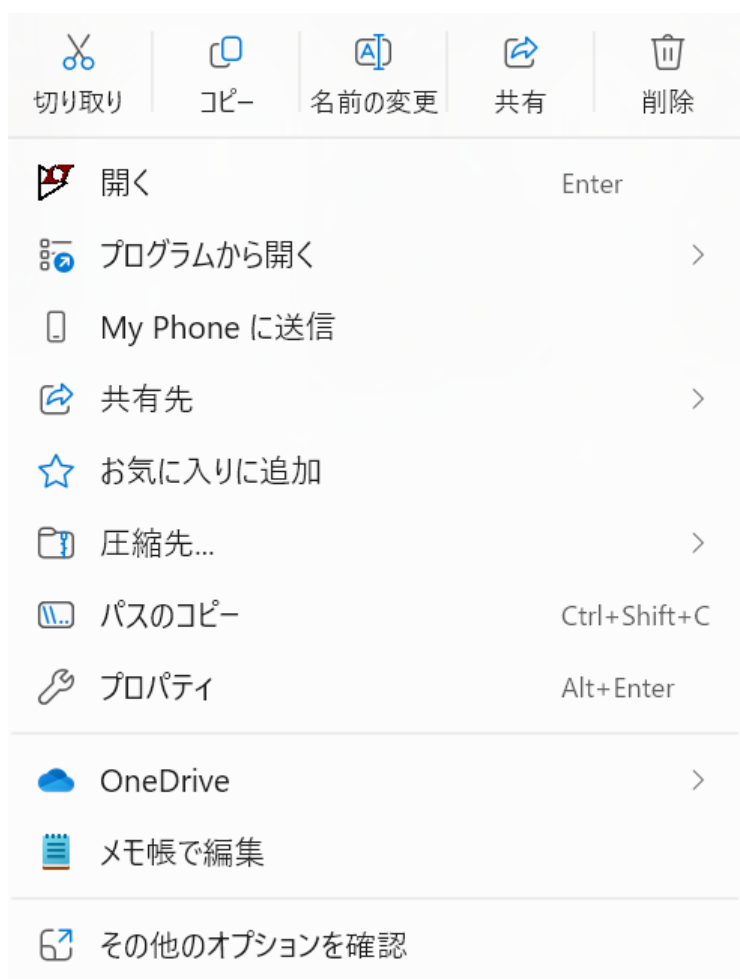
回路図ファイルの関連付け Schematic File Association

「LtAct」の画面から、「ファイル」→「データファイルを開く」によって、回路図ファイルを表示できるようにするために、拡張子の関連付けを行います。

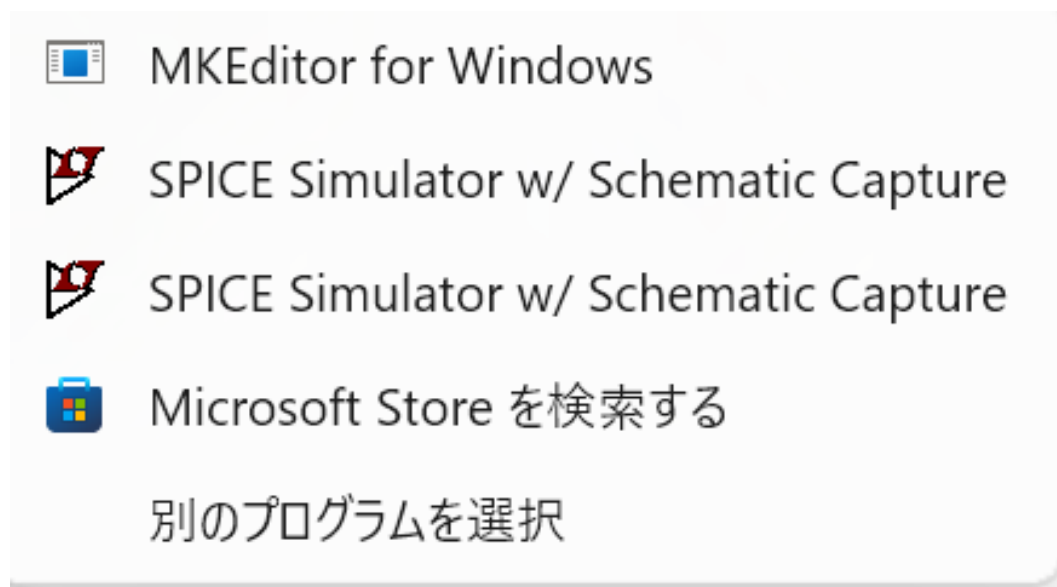
From the "LtAct" screen, associate the extension by selecting "File" -> "Open Data File" so that you can display the circuit diagram file.

エクスプローラで回路図ファイルが保存されているフォルダを開いて、回路図ファイルを右クリックします。

In Explorer, open the folder where the schematic file is saved and right-click the schematic file.



「プログラムから開く」にカーソルを移動します。



「SPICE Simulator w/ Schematic Capture」を左クリックします。

Left-click on "SPICE Simulator w/ Schematic Capture".

準備が出来たので、回路図を確認します Now that we're ready, let's check the circuit diagram.

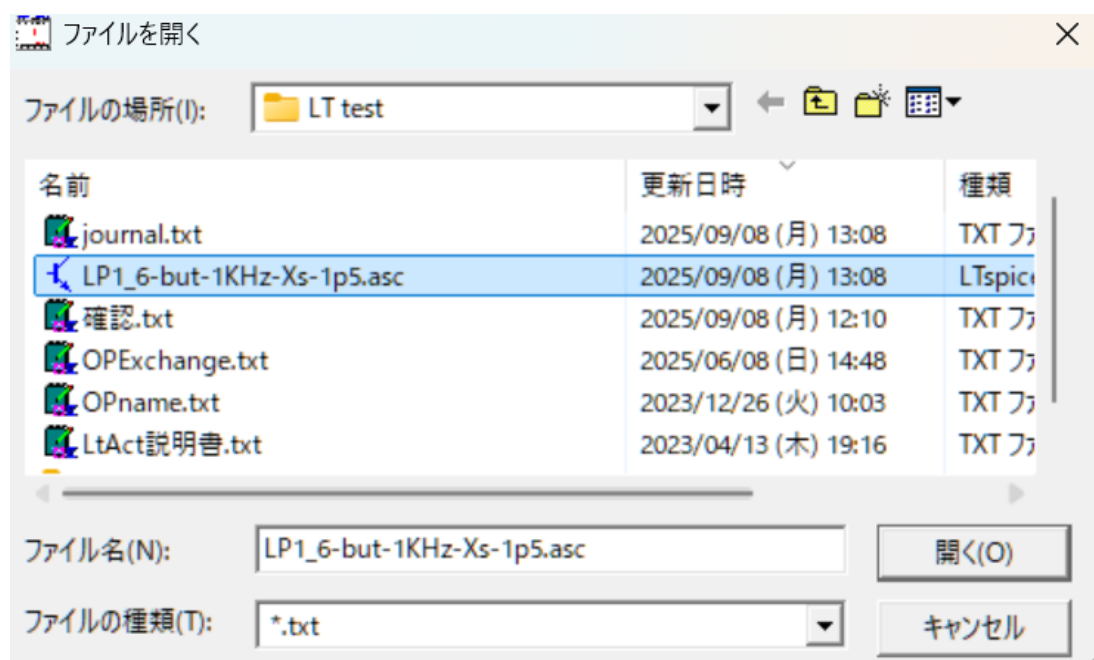
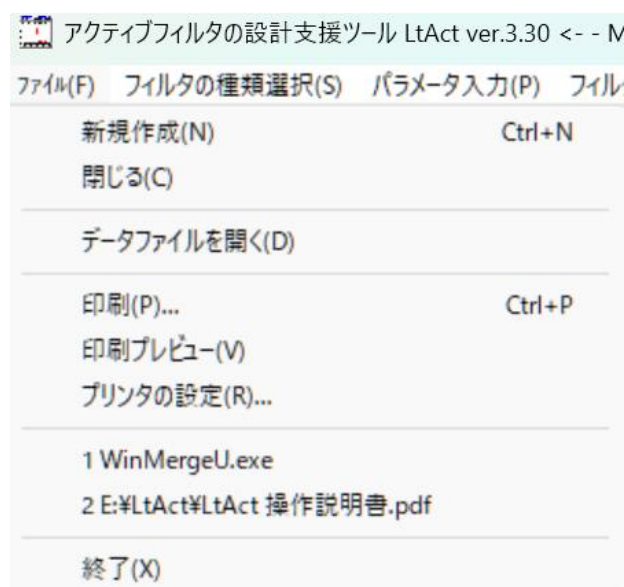
完成した回路図「LP2_6-but-1KHz-Xs-1p5.asc」を「LtSpice」で開いて周波数特性のグラフを確認します。

Open the completed circuit diagram "LP2_6-but-1KHz-Xs-1p5.asc" in "LtSpice" and check the frequency characteristics graph.

Butterworth Low-Pass Filter

ソフトウェア「LtAct」のウィンドウ上部から「ファイル」→「データファイルを開く」を押します。

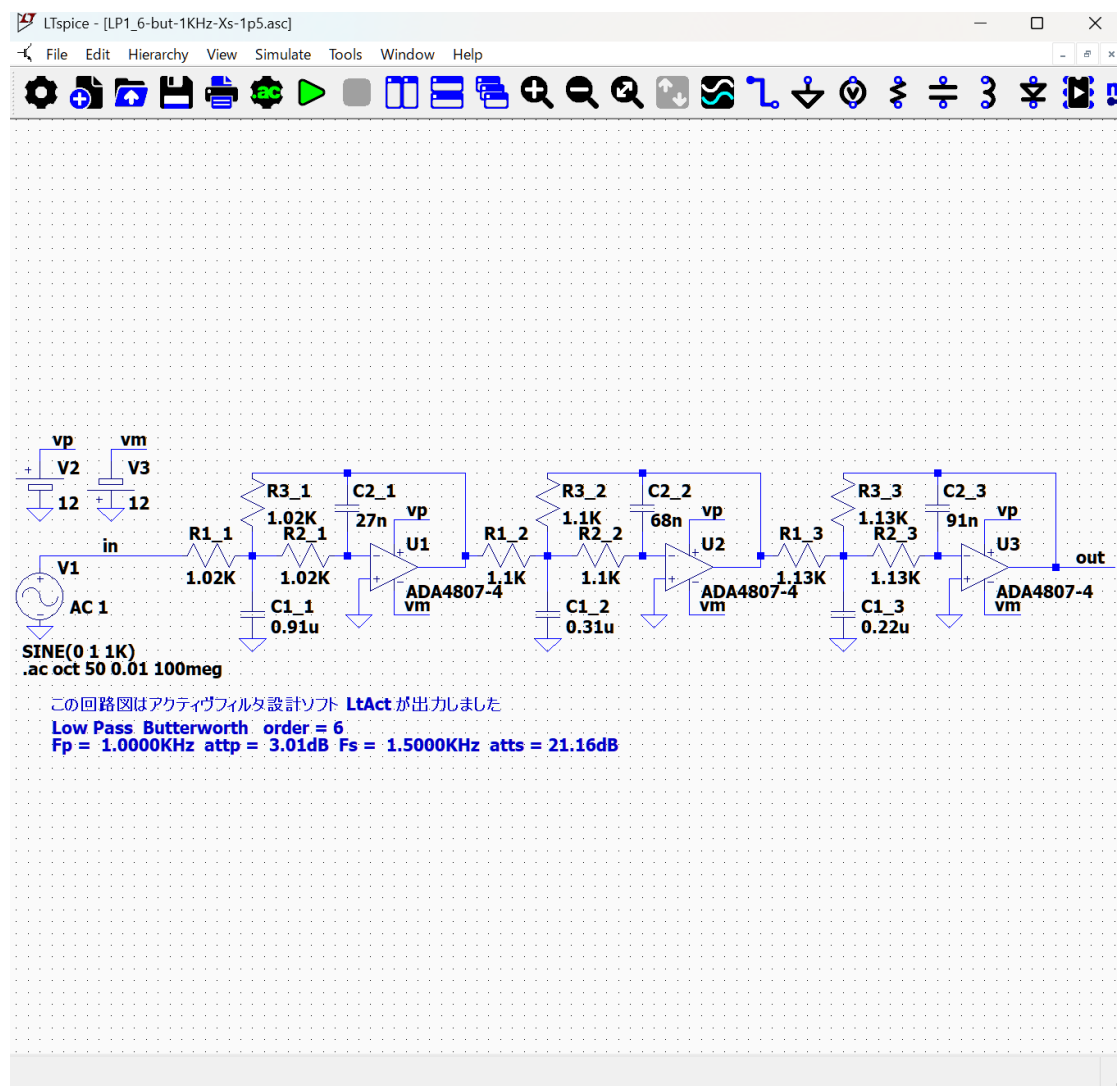
At the top of the "LtAct" software window, click "File" → "データファイルを開く Open Data File."



確認する回路図ファイルを選択して、「開く」を押します。

Select the schematic file you want to check and press "Open".

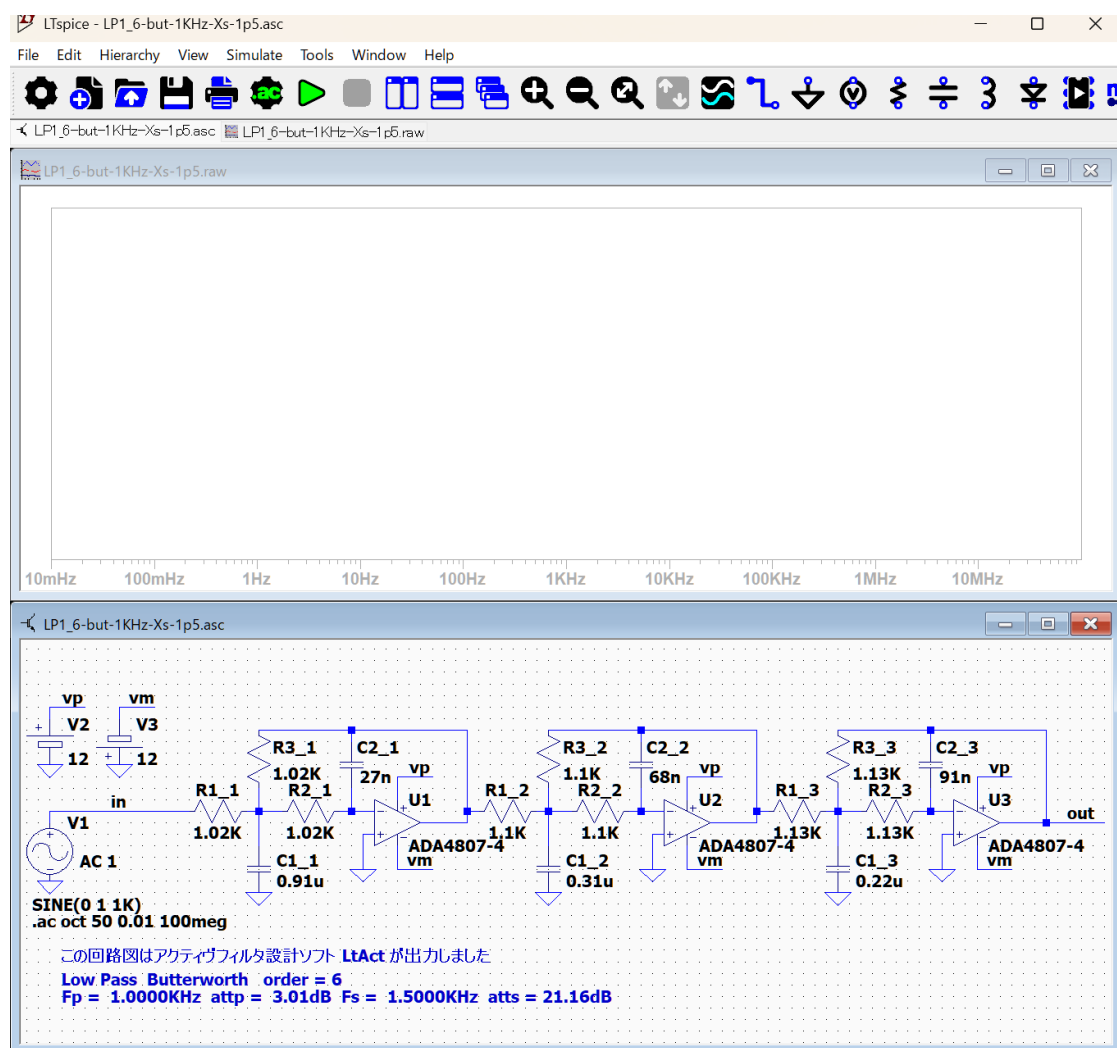
Butterworth Low-Pass Filter



回路図の上に見える「実行」の緑色の矢印マークをクリックします。

Click the green arrow "Run" icon above the circuit diagram.

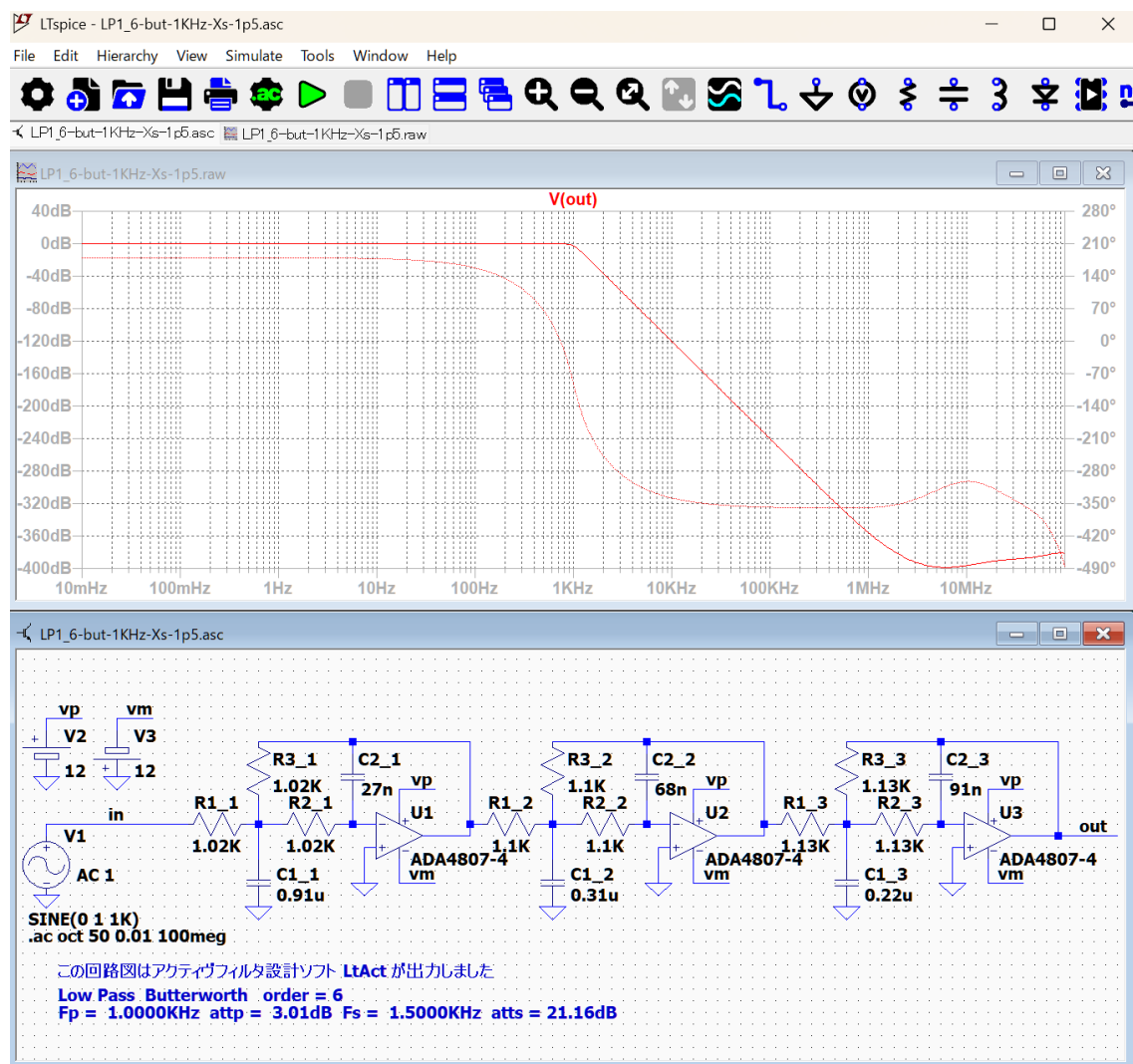
Butterworth Low-Pass Filter



回路図の「out」の上で「左クリック」します。

Left-click on "out" on the circuit diagram.

Butterworth Low-Pass Filter



フィルターの周波数特性グラフが表示されます。

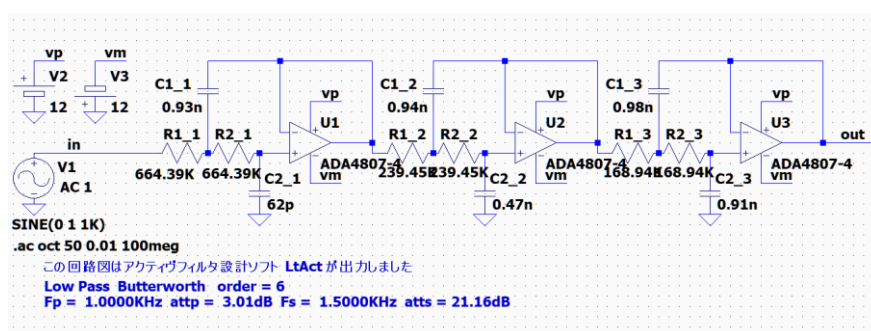
The filter frequency response graph is displayed.

Butterworth Low-Pass Filter

基本回路 LP2 を選択して回路図を作成した I selected the basic circuit LP2 and created the circuit diagram.

今回は回路図の素子値を設定する時に、表示された候補値を変更しないで全て「OK」を押して回路図を作成しました。

This time, when setting the element values for the circuit diagram, I created the circuit diagram by pressing "OK" for all the displayed candidate values without changing them.

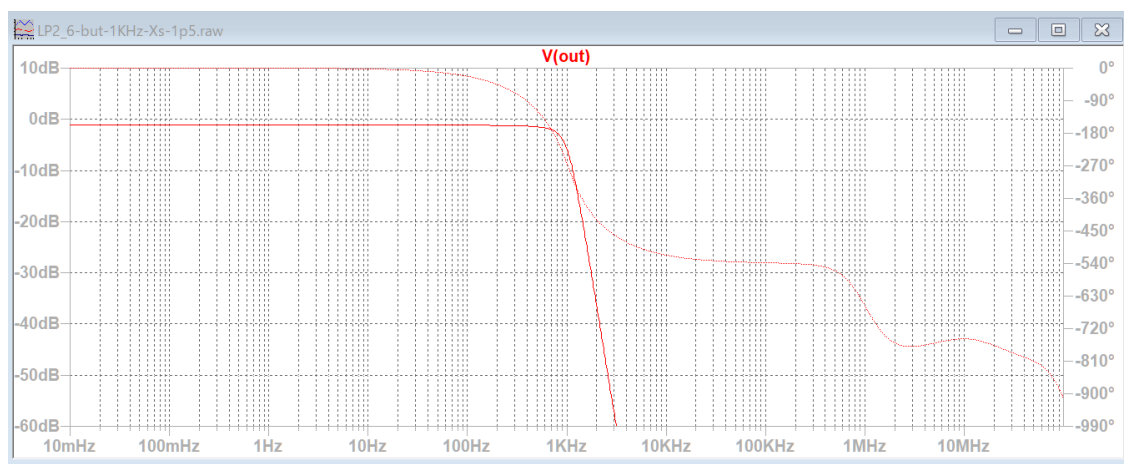


基本回路 LP1 を選択した時は、R1_1 と R2_1 など全て 1 K に変更しましたが、今回の回路図では R1_1 と R2_1 などが数百 K の値になっています。

When we selected the basic circuit LP1, we changed R1_1, R2_1, etc. to 1 K, but in this circuit diagram, R1_1, R2_1, etc. have values of several hundred K.

矢印を押して周波数特性を確認します。

Press the arrows to see the frequency response.



0dB 付近のゲインを拡大して表示すると、通過域のゲインが -1dB 程度になっています。

基本回路 LP2 を選択して回路図を作成した I selected the basic circuit LP2 and created the circuit diagram.

Butterworth Low-Pass Filter

R1_1 と R2_1 などが数百 K の値になったために、OP アンプに必要な入力電流が供給できないことが原因だと思われます。

This is probably because R1_1 and R2_1 etc. have values of several hundred kilohms, which means that the necessary input current cannot be supplied to the op amp.

このような不具合は OP アンプを JFET を使用した OP に変更すると解決します。

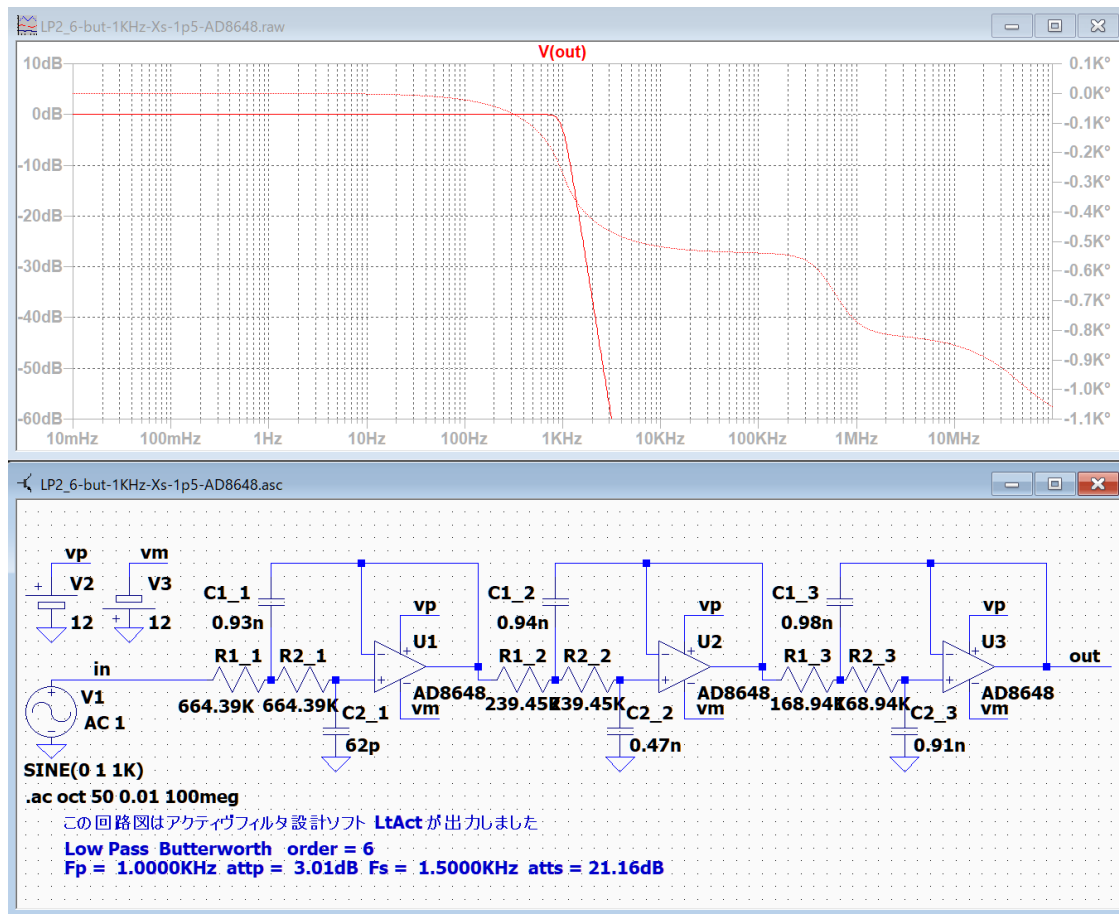
This problem can be solved by changing the op amp to one that uses JFETs.

「LtAct」の操作説明書を開いて、p214 の 6-3 「回路図のオペアンプを交換する」に従って OP アンプを「ADA4807-4」から「AD8648」などに交換して下さい。

Open the "LtAct" operating manual and follow the instructions on page 214, 6-3 "Replacing the op-amp on the circuit diagram" to replace the op-amp from "ADA4807-4" to "AD8648" or similar.

OP アンプを「AD8648」に交換すると、通過域のゲインが 0dB になり解決しました。

Replacing the op amp with an AD8648 solved the problem by reducing the passband gain to 0dB.



Butterworth Low-Pass Filter

急峻な減衰特性を設計する Design steep attenuation characteristics

$X_s(=F_s/F_p)$ を1に近付けるほど減衰特性は急峻になり、フィルタの次数は高くなります。

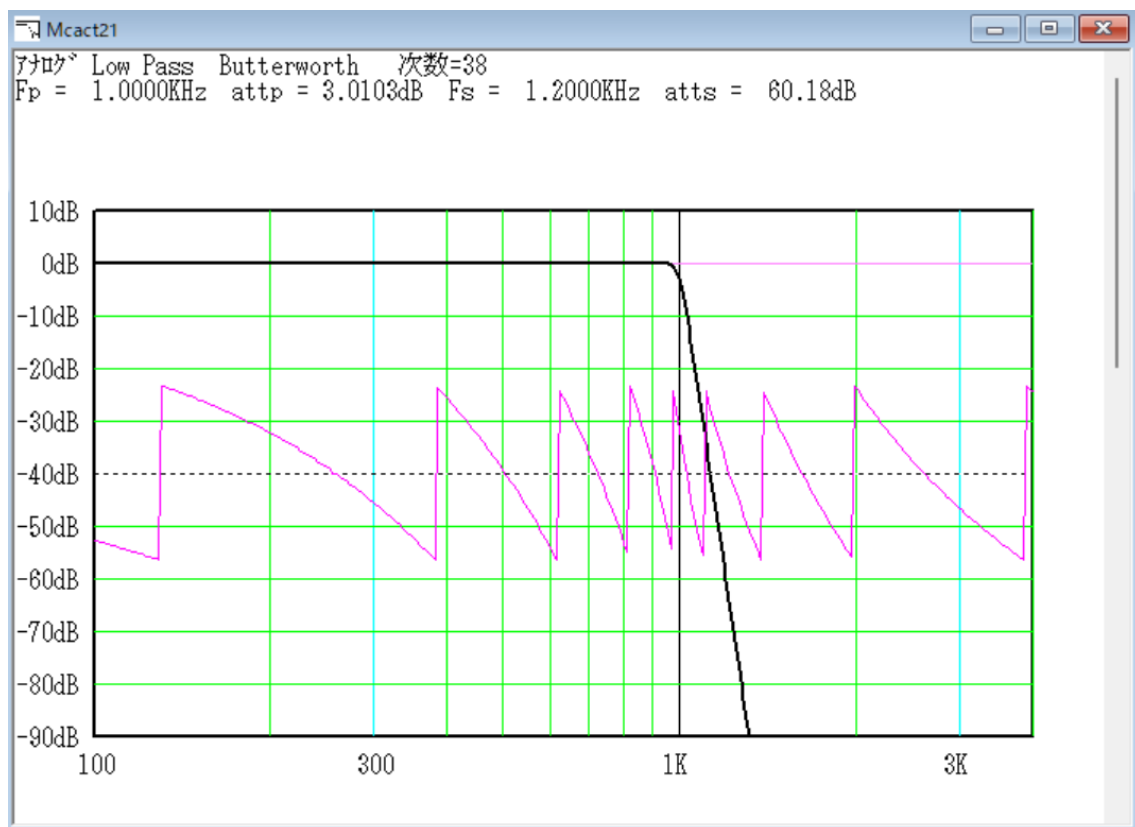
The closer $X_s (= F_s/F_p)$ is to 1, the steeper the attenuation characteristics become, and the higher the filter order increases.

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	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 att_p	3.0102999566398	dB	
減衰量を指定する周波数を F_s として, $X_s = F_s/F_p$	1.2	倍	OK
周波数 F_s における減衰量 $atts$	60	dB	キャンセル

カットオフ周波数 $F_p=1\text{KHz}$ に対して、 1.2KHz での減衰量が 60dB 以上のフィルタを設計する。

Design a filter with a cutoff frequency $F_p = 1\text{ kHz}$ and an attenuation of 60 dB or more at 1.2 kHz .



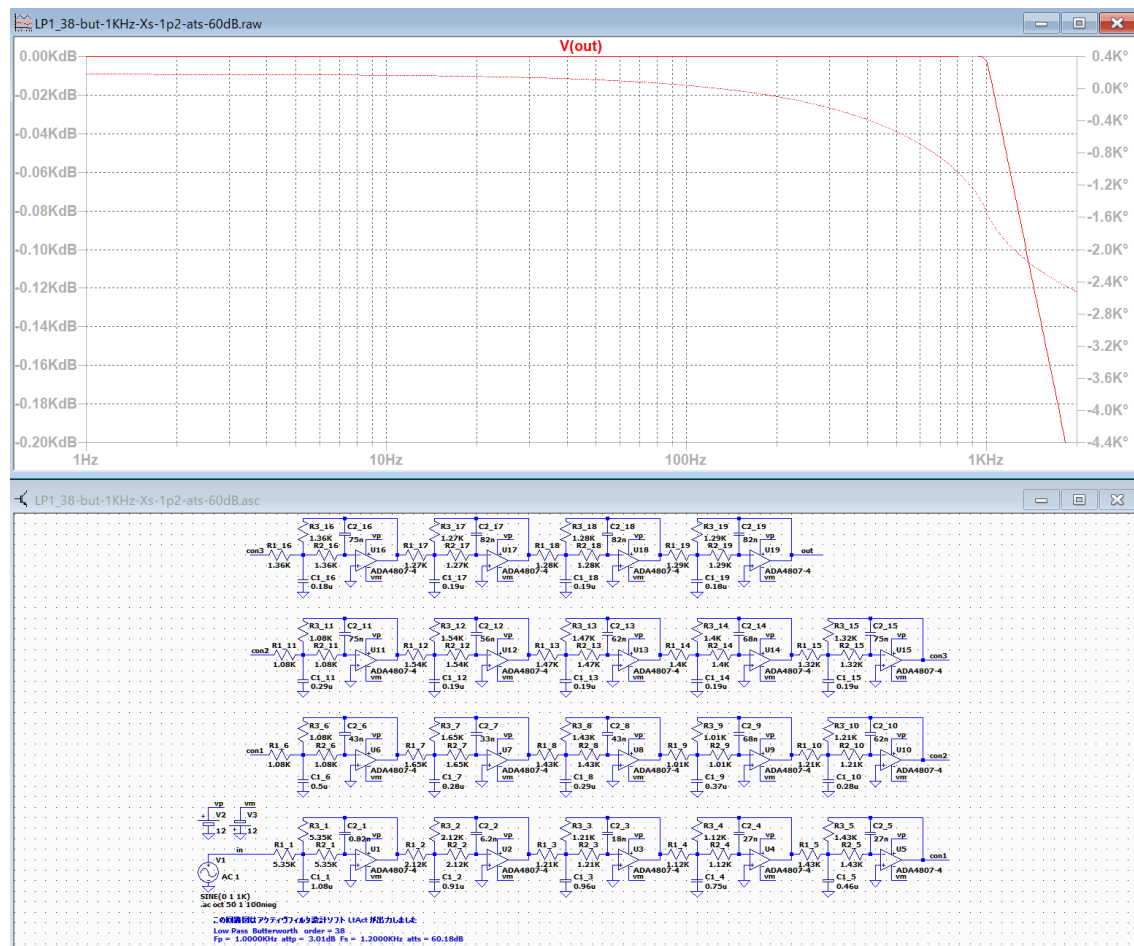
フィルタの次数は 38 次に決定されて、 1.2KHz の減衰量は $60.18\text{dB} > 60\text{dB}$ となる。

The filter order is set to 38th order, resulting in a 1.2 kHz attenuation of $60.18\text{ dB} > 60\text{ dB}$.

Butterworth Low-Pass Filter

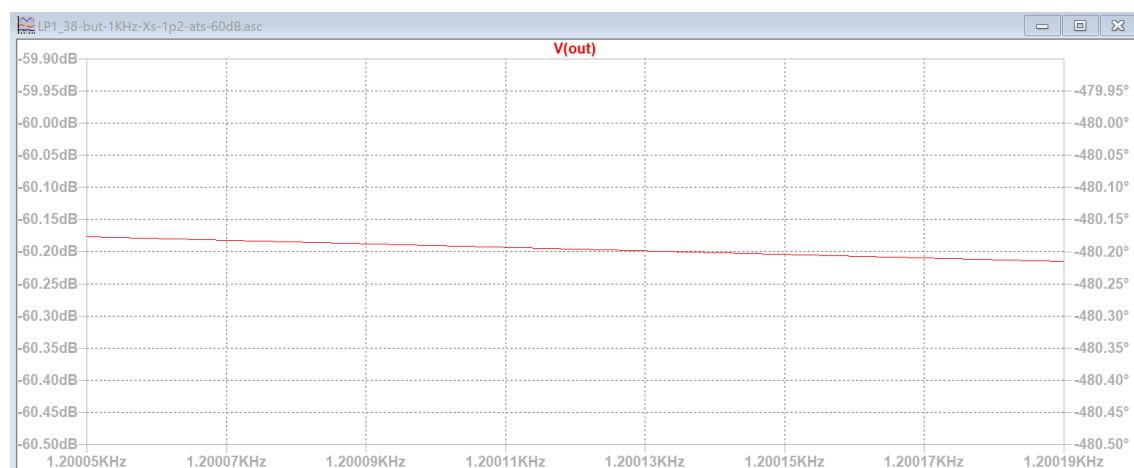
R1_1 などの抵抗値は 1K から 5K 程度の値に設定した。

The resistance values for R1_1 and others were set to values ranging from approximately 1K to 5K.



1.2KHz(=Xs * Fp)で減衰量が 60.2dB > 60dB に達していることが確認できる。

At 1.2 kHz (= Xs × Fp), attenuation reaches 60.2 dB > 60 dB.



Butterworth Low-Pass Filter

$X_s=1.2$ で、 $F_s=1\text{kHz}$ の減衰量を 60dB 以上とする設計 Design to achieve attenuation of 60 dB or more at $F_s = 1\text{ kHz}$ with $X_s = 1.2$

$X_s=F_s/F_p$ より、カットオフ周波数 F_p を $F_p=F_s/X_s=1\text{kHz}/1.2=0.83\text{kHz}$ に設定する。

From $X_s = F_s/F_p$, the cutoff frequency F_p is set to $F_p = X_s/F_s = 1\text{ kHz}/1.2 = 0.83\text{ kHz}$.

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 バターワース

カットオフ付近で減衰域の周波数 F_p 830 Hz

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, $X_s = F_s/F_p$ 1.2 倍 OK

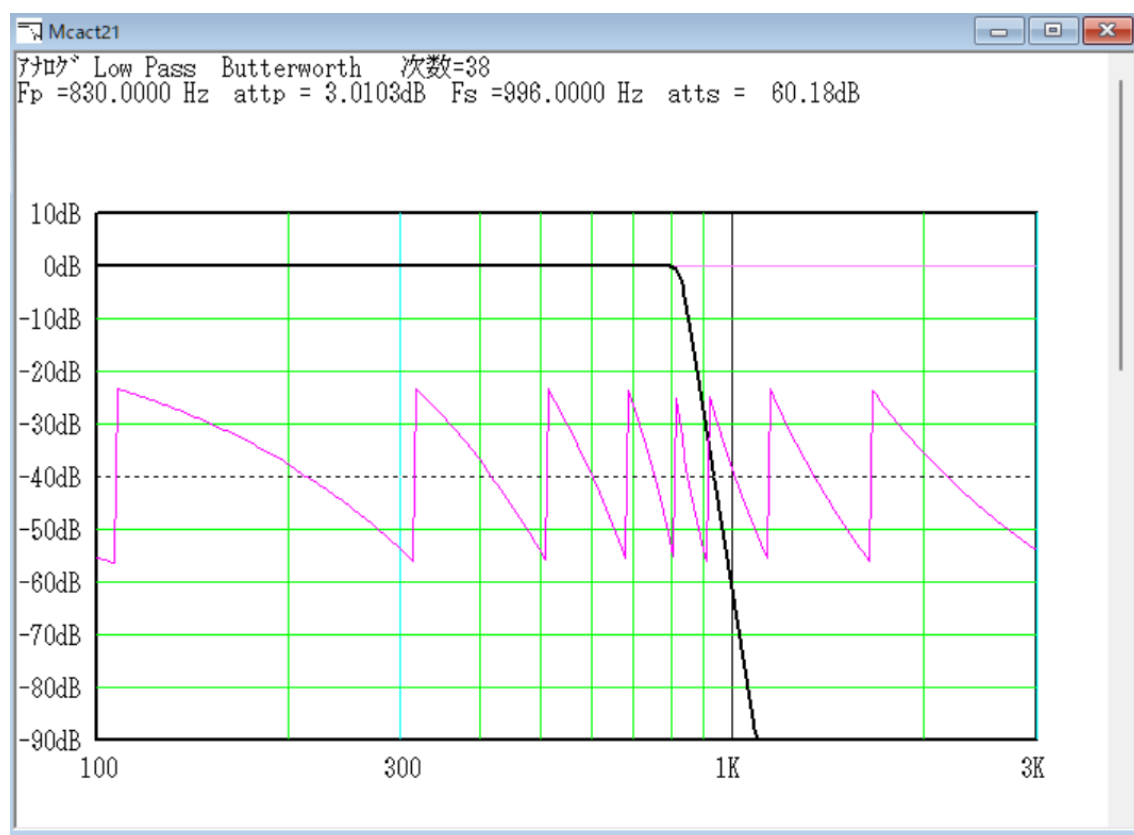
周波数 F_s における減衰量 atts 60 dB キャンセル

カットオフ周波数は 830Hz、フィルタの次数は 38 次に決定される。

周波数 996Hz($F_s=X_s \times F_p$)の減衰量は 60.18dB > 60dB になる。

The cutoff frequency is set to 830 Hz, and the filter order is determined to be 38th order.

The attenuation at 996 Hz ($F_s = X_s \times F_p$) is 60.18 dB > 60 dB.

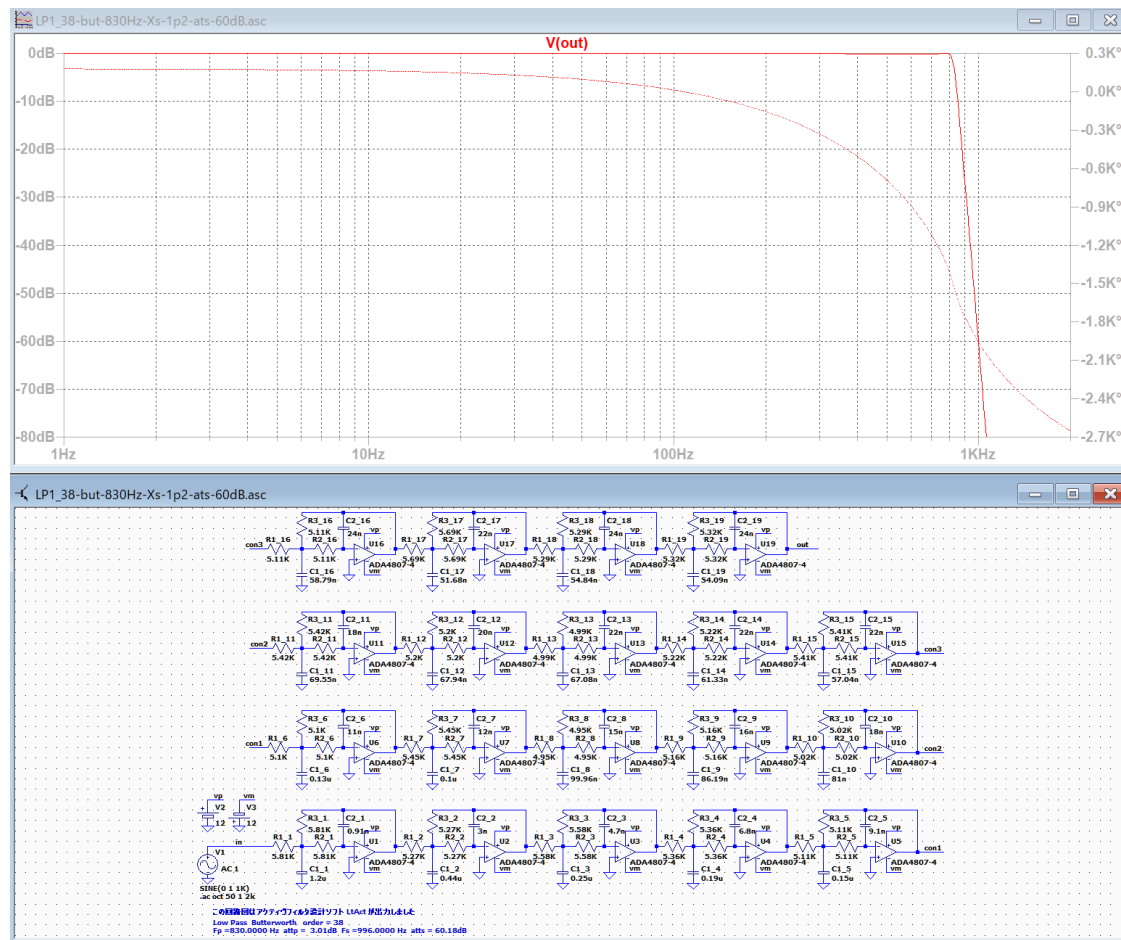


$X_s=1.2$ で、 $F_s=1\text{kHz}$ の減衰量を 60dB 以上とする設計 Design to achieve attenuation of 60 dB or more at $F_s = 1\text{ kHz}$ with $X_s = 1.2$

Butterworth Low-Pass Filter

996Hz(< 1KHz)で減衰量が 60.18dB > 60dB に達することが確認できる。

At 996Hz (< 1KHz), attenuation reaches 60.18dB > 60dB.



Butterworth Low-Pass Filter

フィルタの次数と周波数ごとの減衰量 Filter order and attenuation for each frequency

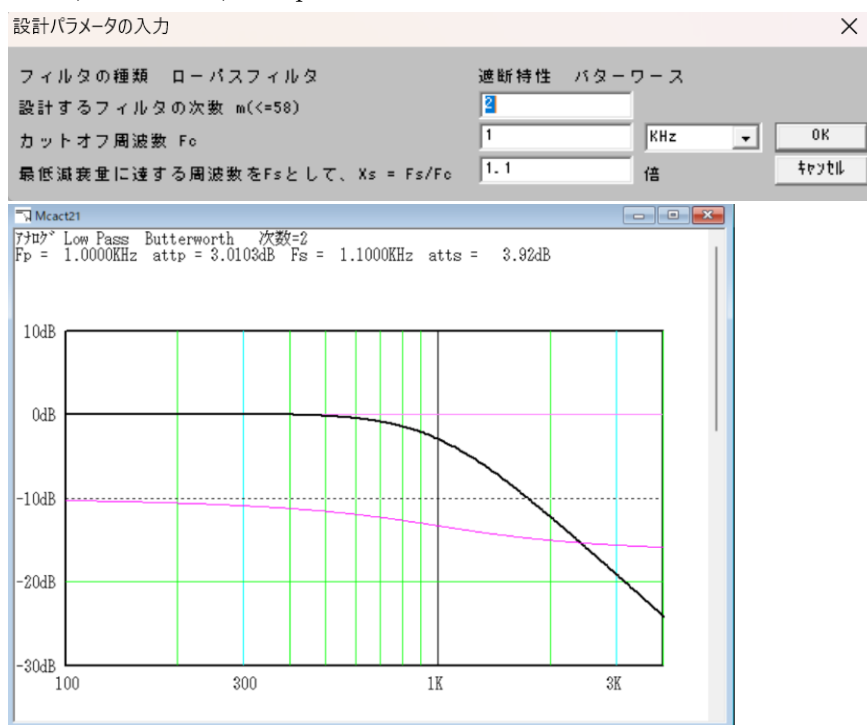
「次数を入力する」で、バターワース・ローパスフィルタの次数が 2 次、6 次、10 次の場合を設計して、周波数ごとに減衰量がどのように変化するかを確認して表を作成しました。

In "Entering the Filter Order," we designed Butterworth low-pass filters with orders of 2nd, 6th, and 10th, and created a table to check how the attenuation changes with frequency.

減衰量の測定方法 How to measure attenuation

「次数を入力する時」の入力方法で、次数を 2、カットオフ周波数を 1KHz、 $X_s=1.1$ と入力して「OK」を押します。

Using the "When entering the order" input method, enter the order as 2, the cutoff frequency as 1KHz, and $X_s=1.1$, then press "OK."



グラフの上部に表示された情報から、 $F_p=1\text{KHz}$ の減衰量は 3.01dB、 $F_s=1.1\text{KHz}$ の減衰量は 3.92dB と確認できます。 $F=0\text{Hz}$ の減衰量はグラフから、0dB とします。

From the information displayed at the top of the graph, we can see that the attenuation for $F_p=1\text{KHz}$ is 3.01dB, and the attenuation for $F_s=1.1\text{KHz}$ is 3.92dB. From the graph, we can assume that the attenuation for $F=0\text{Hz}$ is 0dB.

$F_c=F_p$ とすると、周波数 F の減衰量は $F=0$ 、 F_c 、 $1.1 F_c$ に対して 0, 3, 3.92dB と求められます。

If $F_c=F_p$, the attenuation for frequency F can be calculated as 0, 3, and 3.92dB for $F=0$, F_c , and $1.1 F_c$.

Butterworth Low-Pass Filter

次に、 $X_s=1.5, 2, 10$ に対する設計を行います。

Next, we will design for $X_s=1.5, 2, 10$.

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 バターワース

設計するフィルタの次数 $m(<=58)$ 2

カットオフ周波数 F_c 1 KHz

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

OK キャンセル

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 バターワース

設計するフィルタの次数 $m(<=58)$ 2

カットオフ周波数 F_c 1 KHz

最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$ 2 倍

OK キャンセル

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 バターワース

設計するフィルタの次数 $m(<=58)$ 2

カットオフ周波数 F_c 1 KHz

最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$ 10 倍

OK キャンセル

このようにして、 $F=1.5 F_c, 2 F_c, 10 F_c$ に対して減衰量は 7.83, 12.30, 40dB と求められます。

In this way, the attenuation is calculated as 7.83, 12.30, and 40 dB for $F=1.5 F_c, 2 F_c$, and $10 F_c$.

Butterworth Low-Pass Filter

それから、次数が 6 と 10 についても同様の設計を行って減衰量をまとめると下表が得られます。

Then, by performing a similar design for orders 6 and 10 and summarizing the attenuation amounts, we obtain the table below.

周波数/次数	0	F_c	$1.1 F_c$	$1.5 F_c$	$2 F_c$	dB/oct/order	$10 F_c$	dB/dec/order
2	0	3	3.92	7.83	12.30	6.15	40	20.00
6	0	3	6.17	21.16	36.12	6.02	120	20.00
10	0	3	8.88	35.22	60.12	6.01	200	20.00

カットオフ周波数を F_c として、周波数が 0 Hz, $1.1 F_c$, $1.5 F_c$, $2 F_c$ および $10 F_c$ の減衰量(dB)を測定しました。

The cutoff frequency was set to F_c , and the attenuation (dB) was measured at frequencies of 0 Hz, $1.1 F_c$, $1.5 F_c$, $2 F_c$, and $10 F_c$.

表より、バターワースフィルタの減衰量は、周波数が F_c の時はフィルタの次数によらず 3dB になります。

From the table, we can see that the attenuation of a Butterworth filter is 3dB when the frequency is F_c , regardless of the filter order.

また周波数が 2 倍になるごとに減衰量が 6 dB / 次 増加し、周波数が 10 倍になるごとに減衰量が 20 dB / 次 増加することが分かります。

We can also see that every doubling of frequency increases the attenuation by 6 dB/order, and every ten-fold increase in frequency increases the attenuation by 20 dB/order.

チェビシェフ・ローパスフィルタ Chebyshev low-pass filter

次数を入力する時 When entering the filter order

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 $m(<=58)$	6		
カットオフ周波数 F_c	1	KHz	
周波数 F_c における減衰量又はリプル atp	0.1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s / F_c$	1.5	倍	キャンセル

「1 行目 m 」にフィルタの次数 m を入力する。 Enter the filter order m in "Line 1 m ".

「2 行目 F_c 」にカットオフ周波数 F_c を入力する。 Enter the cutoff frequency F_c in "Line 2 F_c ".

「3 行目 atp 」に通過域のリプルを入力する。 Enter the passband ripple in "3rd line atp ".

「4 行目 X_s 」に減衰量を確認する周波数 F_s と F_c の比 $X_s (=F_s / F_c)$ を入力する。

Enter the ratio $X_s (=F_s/F_c)$ between the frequency F_s and F_c for which you want to check the attenuation in "Line 4, X_s ".

「最低減衰量に達する周波数 F_s 」は「減衰量を確認する周波数 F_s 」の誤りです。

"The frequency F_s at which the minimum attenuation is reached" should be "The frequency F_s at which the attenuation is checked."

注意：ここで設計に必要なパラメータは次数 m とカットオフ周波数 F_c 及び通過域のリプル atp の 3 個だけです。

Note: The only parameters required for design here are the order m , the cutoff frequency F_c , and the passband ripple atp .

X_s はカットオフ周波数 F_c の X_s 倍の周波数で減衰量がどれくらいになるかを確認するため、設計の仕様ではありません。 X_s is used to confirm the amount of attenuation at a frequency that is X_s times the cutoff frequency F_c , and is not a design specification.

m と F_c および atp を変更しなければ、 X_s を変更しても作成される伝達関数は同一になります。

If m , F_c , and atp are not changed, the transfer function created will be the same even if X_s is changed.

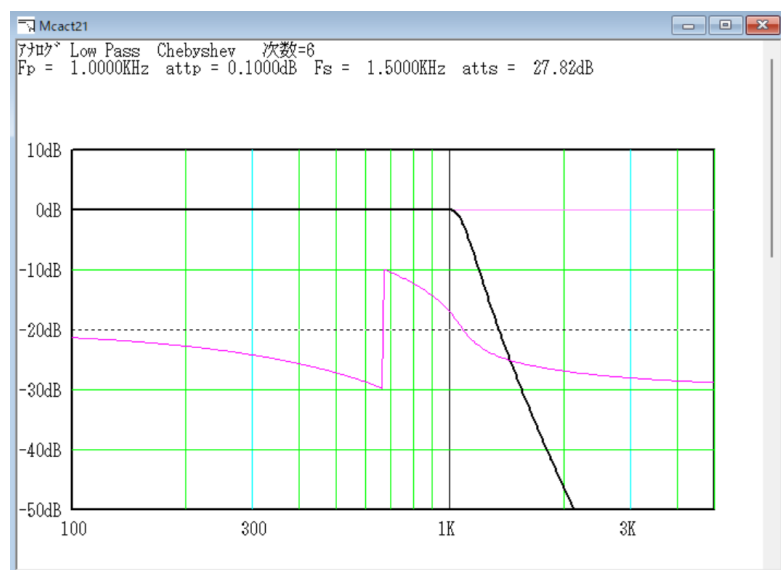
設計仕様の入力後「OK」を押すと、ソフトウェア「LtAct」は設計仕様を満たすフィルタの伝達関数を計算して、伝達関数からローパスフィルタの周波数特性のグラフと周波数 $F_s = X_s * F_c$ における減衰量 $atts$ などを表示して、フィルタの設計を完了します。

After entering the design specifications, click "OK" and the software "LtAct" will calculate the transfer function of the filter that meets the design specifications. From the transfer function, it will display a graph of the low-pass filter's frequency characteristics and the attenuation amount $atts$ at the frequency $F_s = X_s * F_c$, completing the filter design.

Chebyshev low-pass filter

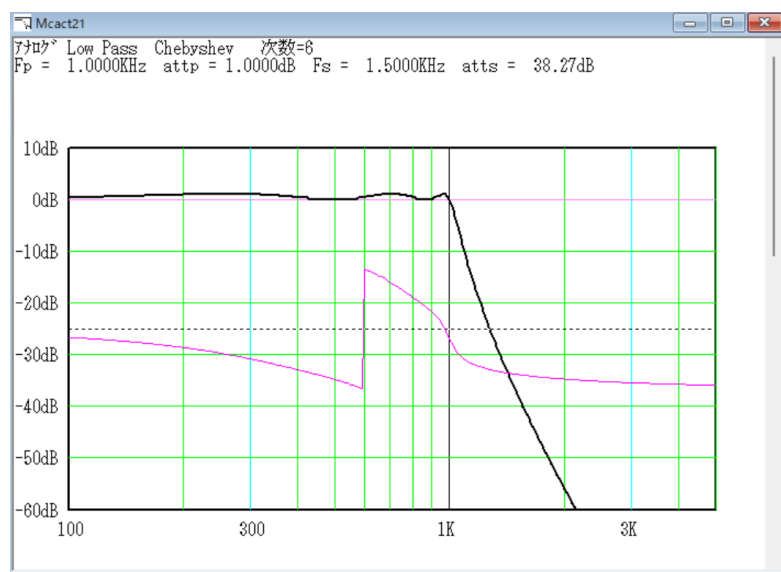
$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $att_p = 0.1\text{dB}$ の場合の周波数特性。

Frequency characteristics when $m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $att_p = 0.1\text{dB}$.



$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $att_p = 1\text{dB}$ の場合の周波数特性。

Frequency characteristics when $m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $att_p = 1\text{dB}$.



チェビシェフフィルタでは att_p が大きくなると、通過域にリップルが発生する。

In a Chebyshev filter, as att_p increases, ripples appear in the passband.

チェビシェフフィルタでは、 m と F_c が同一なら att_p が大きい程、減衰量が増加する。

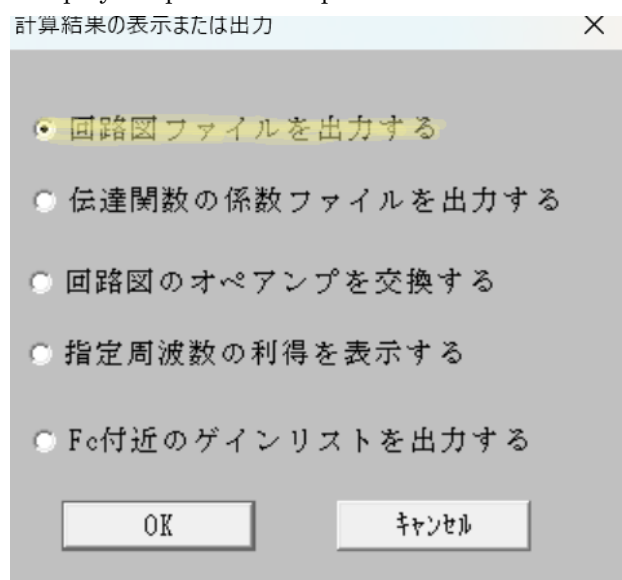
In a Chebyshev filter, if m and F_c are the same, the larger att_p is, the greater the attenuation.

回路図を作成する Create a schematic

伝達関数の係数から回路図を作成するには、ソフトウェア「LtAct」のウィンドウ上部から「表示・出力」を押します。

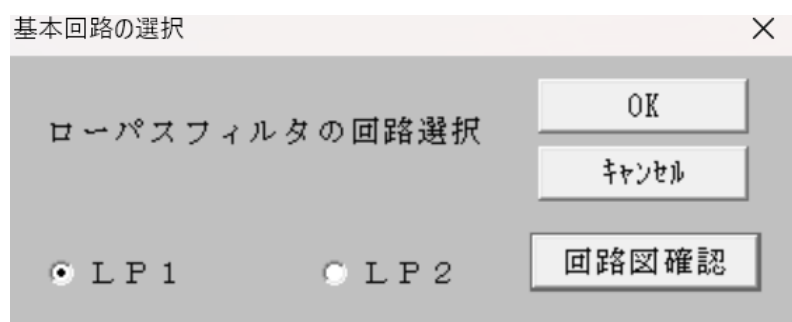
To create a circuit diagram from the transfer function coefficients, click "表示・出力

Display/Output" at the top of the "LtAct" software window.



「回路図ファイルを出力する」をチェックして「OK」を押します。

Check "回路図ファイルを出力する Export schematic file" and press "OK".



基本回路図は LP1 または LP2 を選択できます。

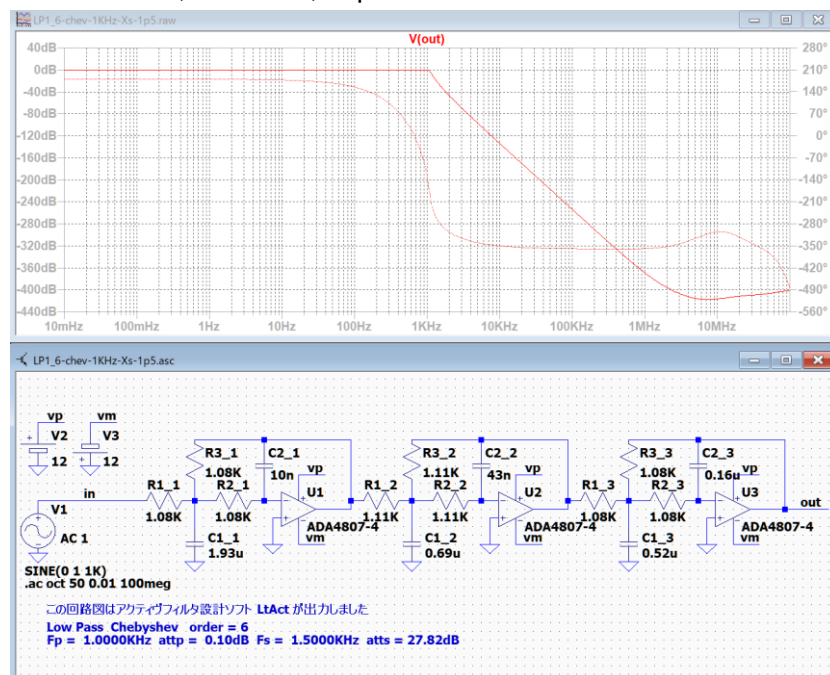
The basic circuit diagram can be selected as LP1 or LP2.

チェビシェフ・ローパスフィルタの基本回路はバターワース・ローパスフィルタと同様に LP1 または LP2 を選択できます。

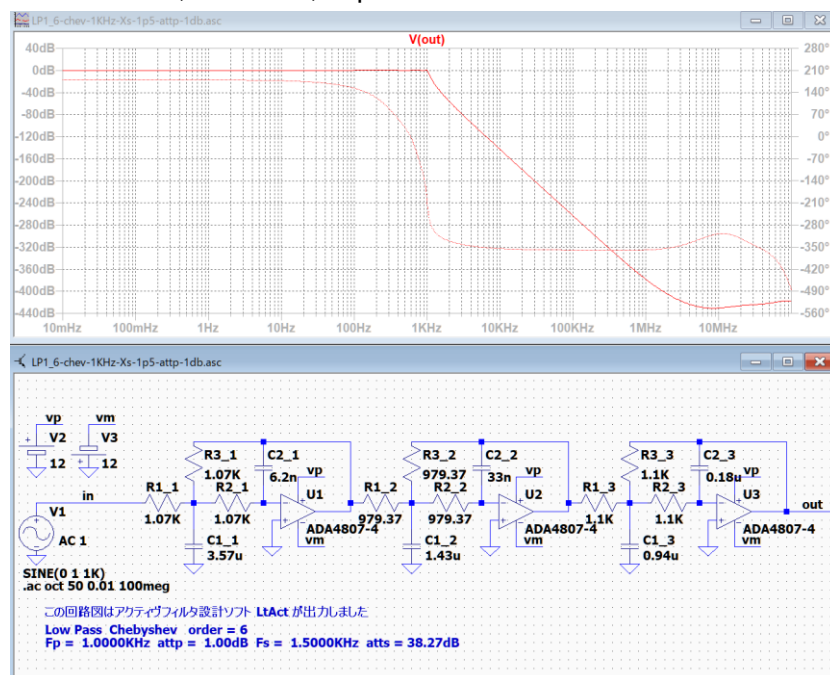
The basic circuit of the Chebyshev low-pass filter can be selected as either LP1 or LP2, just like the Butterworth low-pass filter.

Chebyshev low-pass filter

$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $attp = 0.1\text{dB}$



$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $attp = 1\text{dB}$



1.5KHz の減衰量は $attp=0.1\text{dB}$ では 27.82dB、 $attp=1\text{dB}$ では 38.27dB に減衰量が増加する。

The attenuation at 1.5KHz is 27.82dB when $attp=0.1\text{dB}$, and increases to 38.27dB when $attp=1\text{dB}$.

Chebyshev low-pass filter

次数を入力しない時 When you do not enter the filter order

$F_p=1\text{KHz}$, $att_p=0.1\text{dB}$, $X_s=1.5$ の場合、周波数 $F_s=X_s \cdot F_p=1.5\text{KHz}$ における減衰量が 60dB 以上となるフィルタを設計する場合には、次数を入力しない方法を用います。

When $F_p=1\text{KHz}$, $att_p=0.1\text{dB}$, $X_s=1.5$, and you want to design a filter with an attenuation of 60dB or more at the frequency $F_s=X_s \cdot F_p=1.5\text{KHz}$, use the method of not entering the order.

設計パラメータの入力

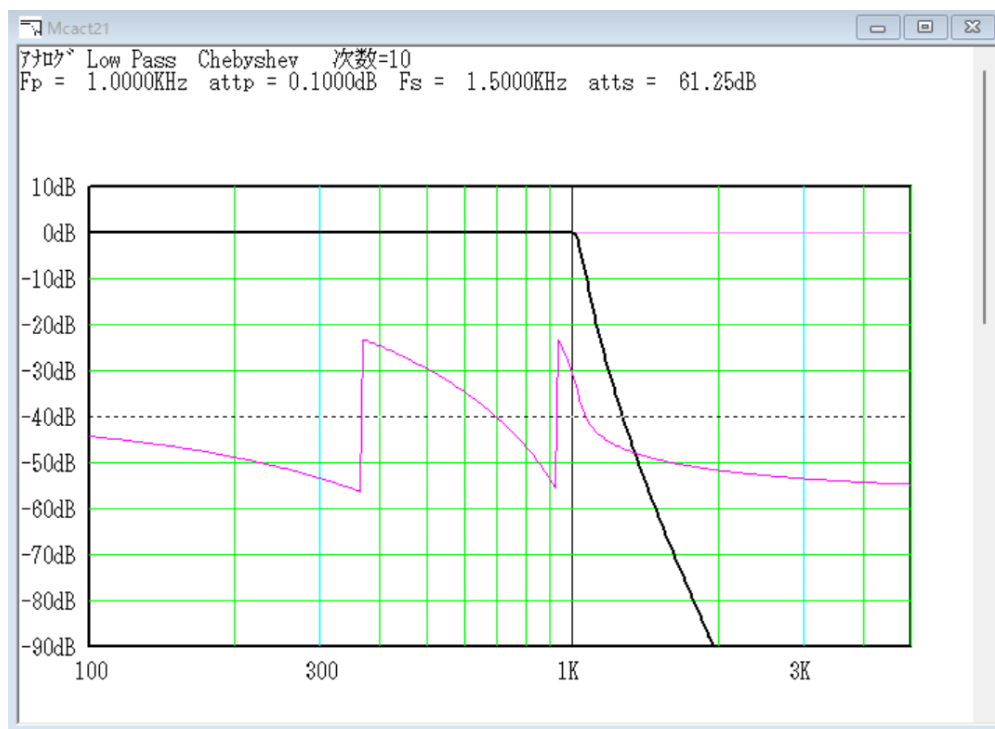
フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Chebyshev
カットオフ周波数 F_p	1	単位	KHz
周波数 F_p における減衰量又はリップル att_p	0.1	単位	dB
減衰量を指定する周波数を F_s として, $X_s = F_s/F_p$	1.5	単位	倍
周波数 F_s における減衰量 $atts$	60	単位	dB

OK キャンセル

「OK」を押す。 Press "OK".

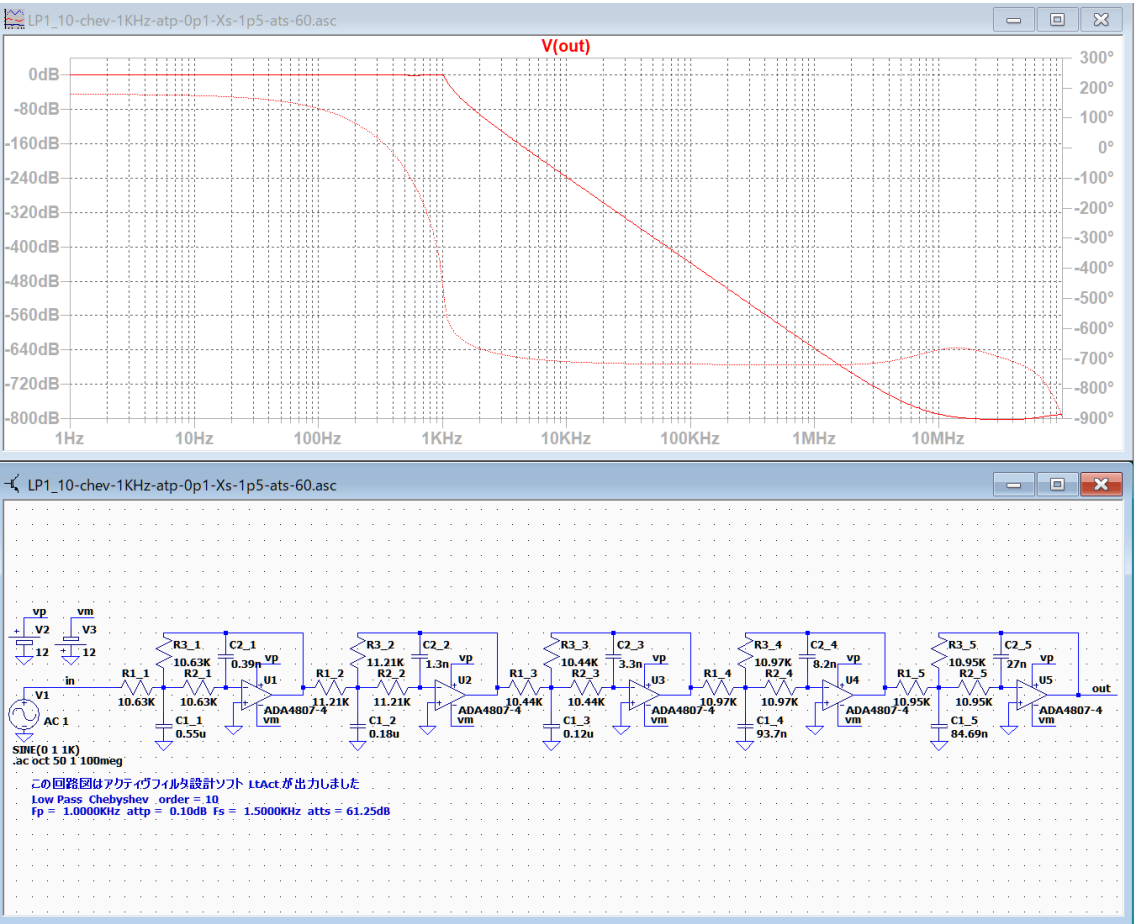
10 次フィルタになり、 X_s で指定される 1.5KHz における減衰量が $61.25\text{dB} > 60\text{dB}$ になった。

It is a 10th order filter, and the attenuation at 1.5KHz specified by X_s is now $61.25\text{dB} > 60\text{dB}$.



Chebyshev low-pass filter

回路図 circuit diagram



Chebyshev low-pass filter

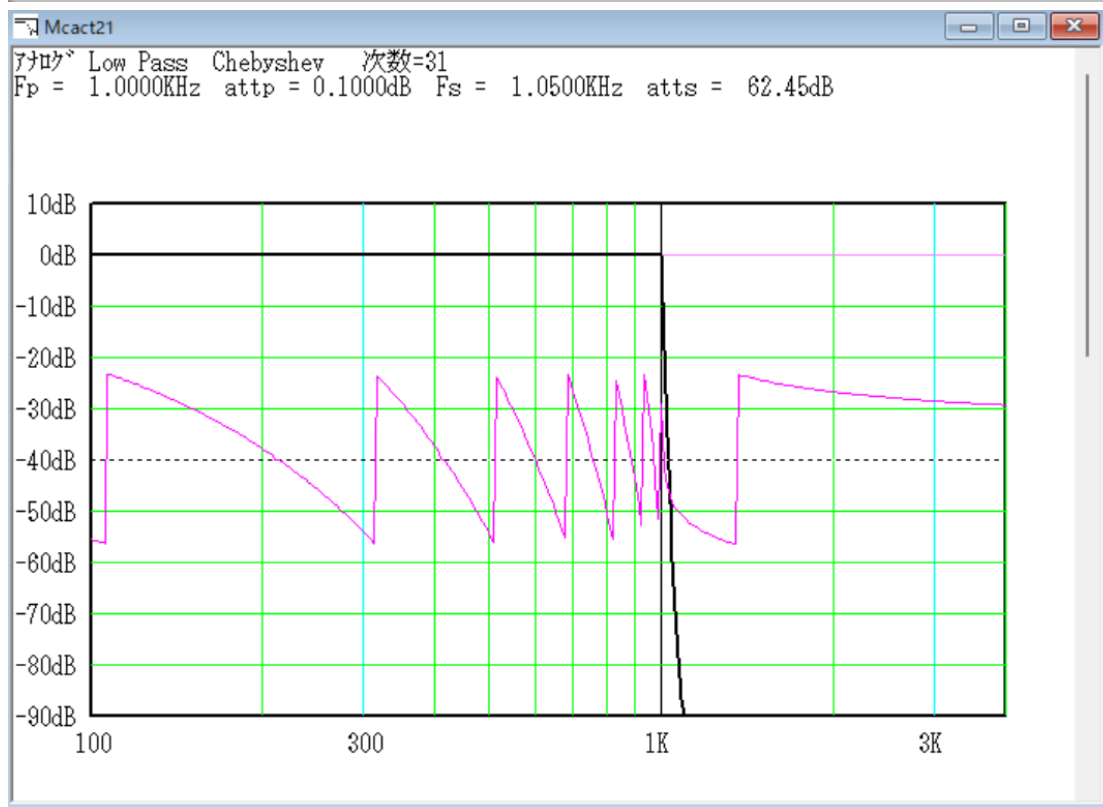
急峻な減衰特性を設計する Design steep attenuation characteristics

チェビシェフ・フィルタはバターワース・フィルタよりも遮断特性が優れているので、バターワースの時よりも小さい値 $X_s = 1.05$ に設定してみる。

Since the Chebyshev filter has superior cutoff characteristics compared to the Butterworth filter, we will set X_s to a smaller value of 1.05 than for the Butterworth filter.

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ップル att_p	0.1	dB	
減衰量を指定する周波数を F_s として, $X_s = F_s/F_p$	1.05	倍	OK
周波数 F_s における減衰量 att_s	60	dB	キャンセル



フィルタの次数が 31 次に決定されました。しかし、20 次以上のフィルタの基本回路図は偶数次数しか準備されていません。「次数を入力する時」の入力方法で次数を 32 次を設定します。

The filter order has been determined to be 31st. However, basic circuit diagrams for filters of order 20 or higher are only available for even orders. Set the order to 32nd using the "Entering Order" input method.

Chebyshev low-pass filter

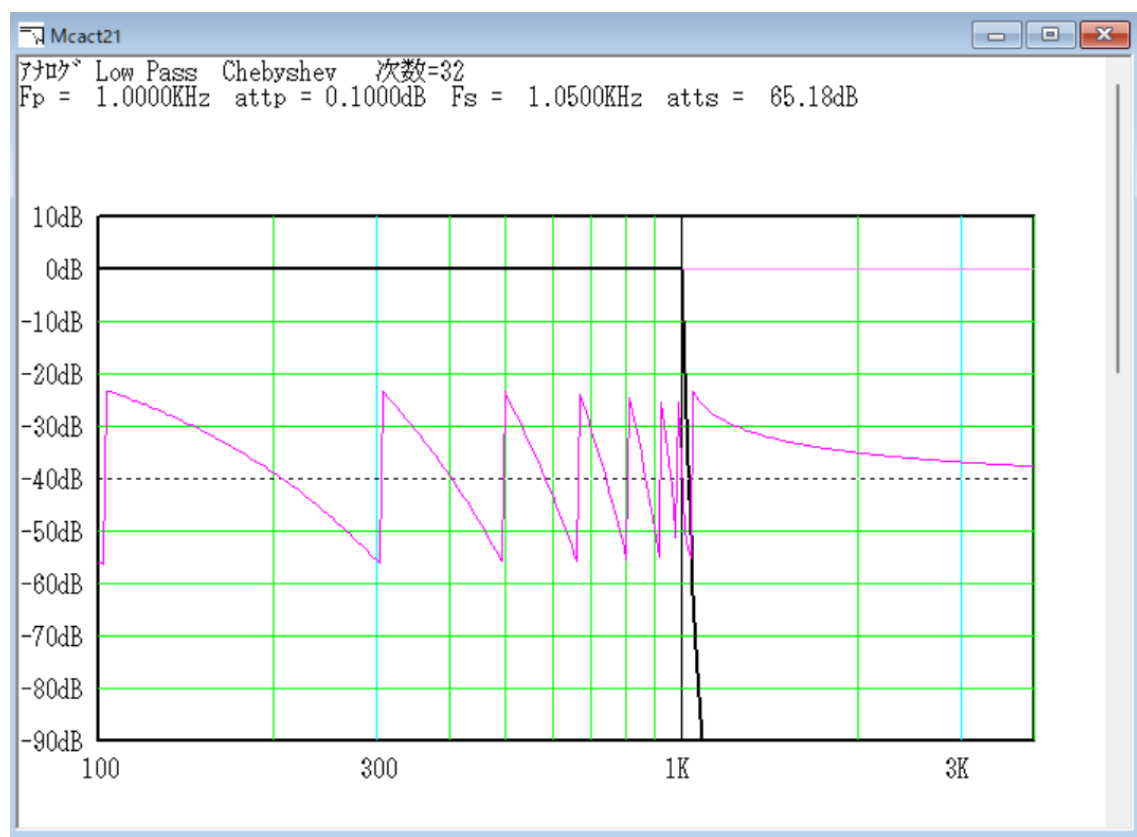
次数を 32 次を設定して、設計を行う Set the degree to 32 and proceed with the design.

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 $m(<=58)$	32		
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、 $X_s = F_s/F_c$	1.05	倍	キャンセル

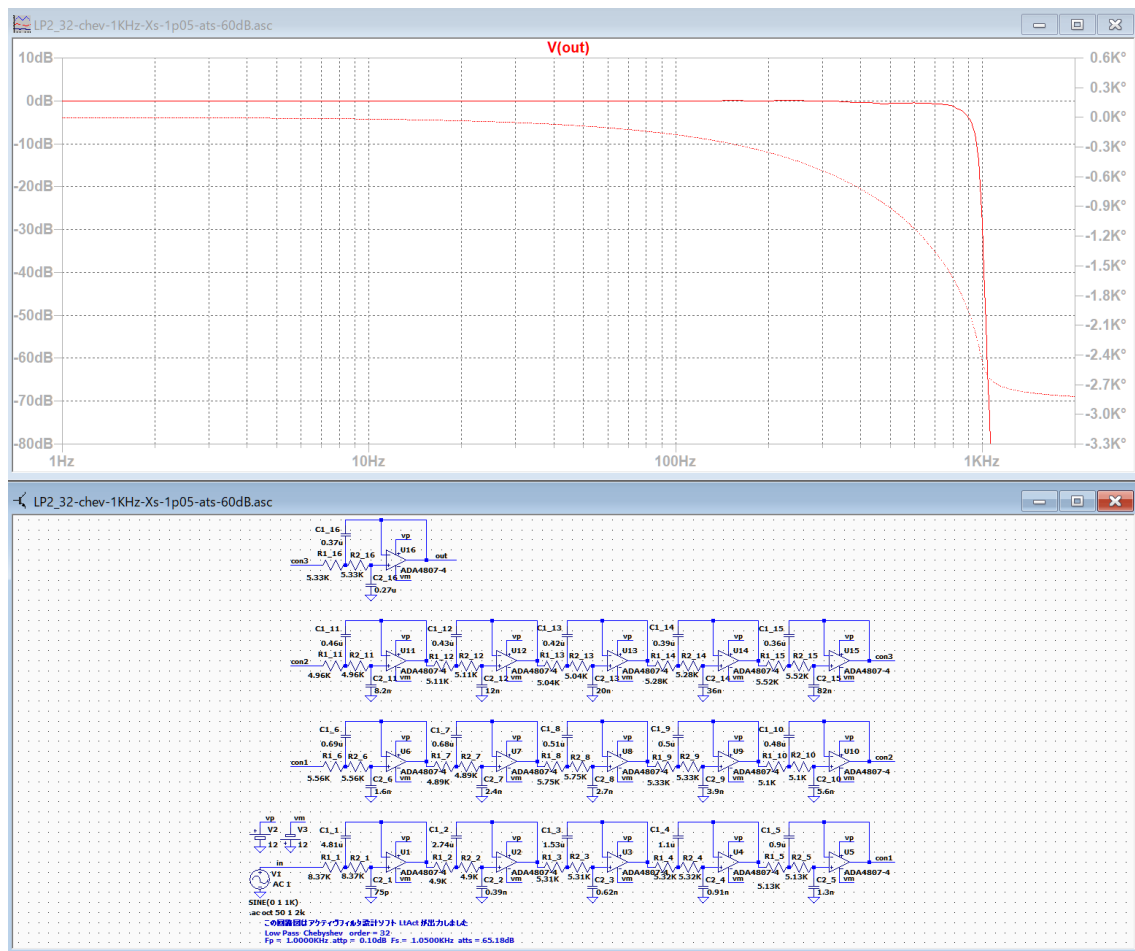
フィルタの次数が 32 次で、周波数が 1.05KHz の減衰量は 65.18dB > 60dB になります。

The attenuation at 1.05 kHz for a 32nd-order filter is 65.18 dB > 60 dB.



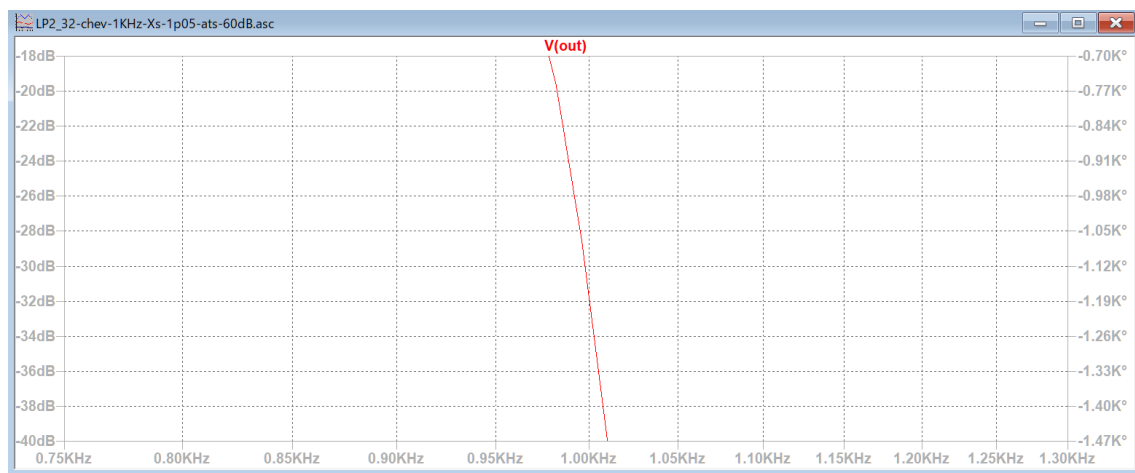
次数を 32 次を設定して、設計を行う Set the degree to 32 and proceed with the design.

Chebyshev low-pass filter



1KHz の減衰量が大きすぎる。

The attenuation at 1 kHz is too large.



1KHz の減衰量が -32dB になっているので、オペアンプを AD8648 に交換します。

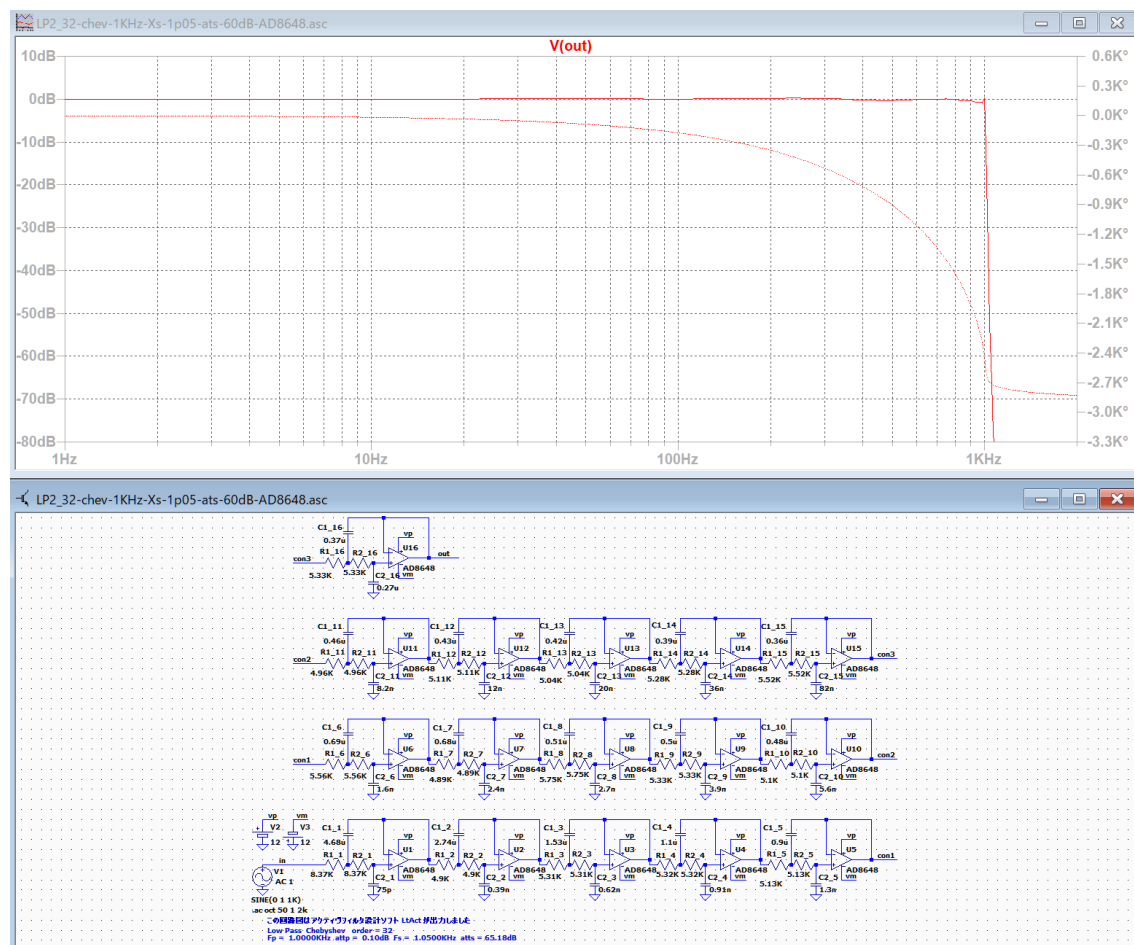
Since the attenuation at 1 kHz is -32 dB, we will replace the op-amp with an AD8648.

次数を 32 次を設定して、設計を行う Set the degree to 32 and proceed with the design.

Chebyshev low-pass filter

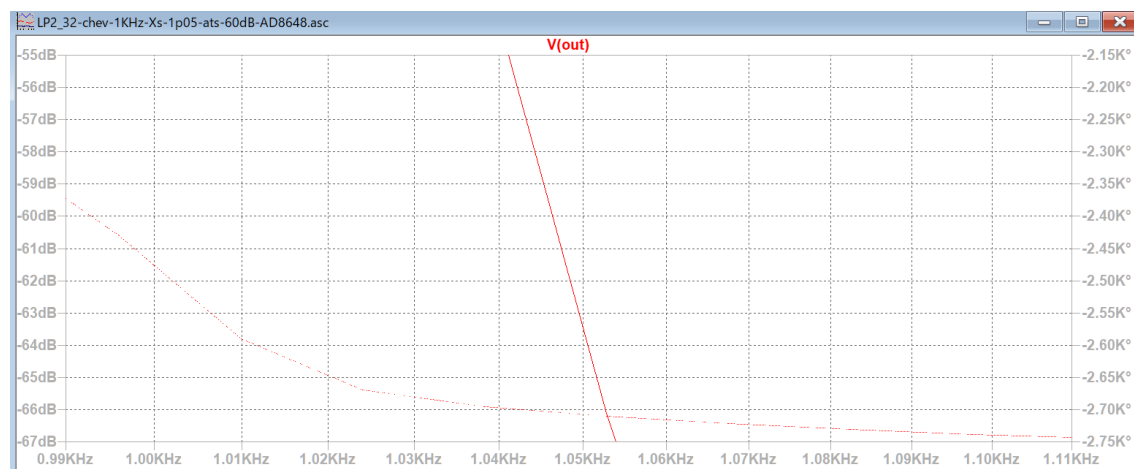
1KHz の減衰量が 0dB に近づきました。

The attenuation at 1 kHz has approached 0 dB.



1.05KHz の減衰量が 63.5dB > 60dB になっていることが確認できます。

The attenuation at 1.05 kHz is confirmed to be 63.5 dB > 60 dB.



次数を 32 次に設定して、設計を行う Set the degree to 32 and proceed with the design.

Chebyshev low-pass filter

フィルタの次数と周波数ごとの減衰量 Filter order and attenuation for each frequency

「次数を入力する」で、チェビシェフ・ローパスフィルタの次数が 2 次、6 次、10 次の場合を設計して、周波数ごとに減衰量がどのように変化するかを確認して表を作成しました。

In "Entering the Order," we designed Chebyshev low-pass filters with orders of 2nd, 6th, and 10th, and created a table to check how the attenuation changes with frequency.

減衰量の測定方法 How to measure attenuation

「次数を入力する時」の入力方法で、次数を 2、カットオフ周波数を 1KHz、attp=0.1dB、Xs=1.1 と入力して「OK」を押します。

Using the "When entering the order" input method, enter the order as 2, the cutoff frequency as 1KHz, attp=0.1dB, and Xs=1.1, then press "OK."

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

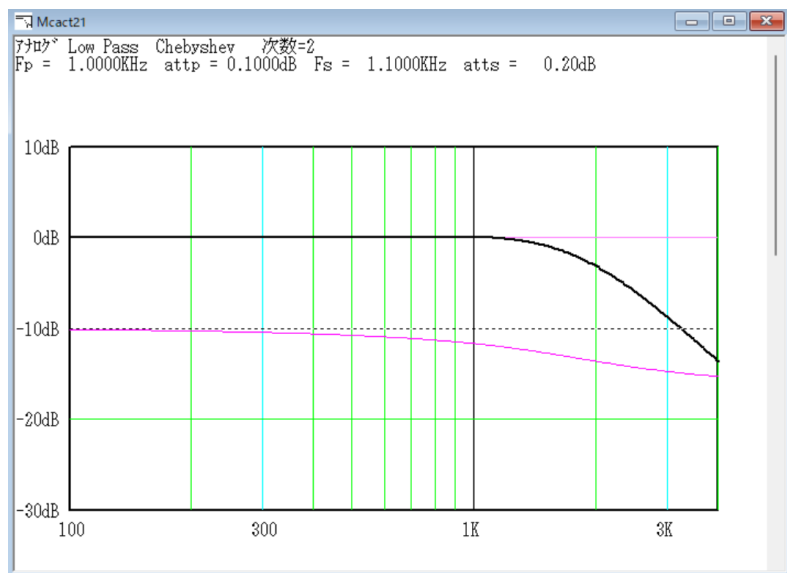
設計するフィルタの次数 $m(\leq 58)$ 2

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、 $X_s = F_s / F_c$ 1.1 倍

OK キャンセル



グラフの上部に表示された情報から、 $F_c=1\text{KHz}$ の減衰量は 0.1dB、 $F_s=1.1\text{KHz}$ の減衰量は 0.2dB と確認できます。 $F=0\text{Hz}$ の減衰量はグラフから、0dB とします。

From the information displayed at the top of the graph, we can see that the attenuation for $F_c=1\text{KHz}$ is 0.1dB, and the attenuation for $F_s=1.1\text{KHz}$ is 0.2dB. From the graph, we can see that the attenuation for $F=0\text{Hz}$ is 0dB.

Chebyshev low-pass filter

周波数 F の減衰量は $F=0$ 、 F_c 、 $1.1 F_c$ に対して 0, 0.1, 0.2dB と求められます。

The attenuation of frequency F is calculated as 0, 0.1, 0.2dB for $F=0$, F_c , $1.1 F_c$.

次に、 $X_s=1.5, 2, 10$ に対する設計を行います。

Next, we will design for $X_s=1.5, 2, 10$.

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 $m(<=58)$	2		
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

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 $m(<=58)$	2		
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、 $X_s = F_s/F_c$	2	倍	キャンセル

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 $m(<=58)$	2		
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、 $X_s = F_s/F_c$	10	倍	キャンセル

このようにして、 $F=1.5 F_c$ 、 $2 F_c$ 、 $10 F_c$ に対して 1.09, 3.31, 29.65dB と求められます。

In this way, we get 1.09, 3.31, and 29.65dB for $F=1.5 F_c$, $2 F_c$, and $10 F_c$.

Chebyshev low-pass filter

次に、次数を 2、カットオフ周波数を 1KHz、attp=1dB と入力して、Xs=1.1, 1.5, 2 および 10 の設計を行います。

Next, enter the order as 2, the cutoff frequency as 1KHz, and attp=1dB, and design Xs=1.1, 1.5, 2, and 10.

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 $m(<=58)$	2		
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	1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$	1.1	倍	キャンセル

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 $m(<=58)$	2		
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	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

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 $m(<=58)$	2		
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	1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$	2	倍	キャンセル

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 $m(<=58)$	2		
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	1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$	10	倍	キャンセル

Chebyshev low-pass filter

それから、次数が 6 と 10 についても同様の設計を行って減衰量をまとめると下表が得られます。

Then, by performing a similar design for orders 6 and 10 and summarizing the attenuation amounts, we obtain the table below.

チェビシェフ・ローパスフィルタの減衰量(dB) リプルが 0.1dB の場合

周波数/次数	0	Fc	1.1 Fc	1.5 Fc	2 Fc	dB/oct/order	10 Fc	dB/dec/order
2	0	0	0.20	1.09	3.31	1.66	29.65	14.83
6	0	0	3.43	27.82	46.29	7.72	133.64	22.27
10	0	0	16.28	61.25	92.04	9.20	237.64	23.76

チェビシェフ・ローパスフィルタの減衰量(dB) リプルが 1dB の場合

周波数/次数	0	Fc	1.1 Fc	1.5 Fc	2 Fc	dB/oct/order	10 Fc	dB/dec/order
2	0	0	1.82	6.20	11.36	5.68	40.11	20.06
6	0	0	11.58	38.27	56.74	9.46	144.10	24.02
10	0	0	26.65	71.71	102.50	10.25	248.10	24.81

通過域のリプルが 0.1dB と 1dB の場合について、カットオフ周波数を Fc として、周波数が 0Hz, 1.1 Fc, 1.5 Fc, 2 Fc および 10 Fc の減衰量(dB)を測定しました。

For passband ripples of 0.1dB and 1dB, the attenuation (dB) was measured at frequencies of 0Hz, 1.1 Fc, 1.5 Fc, 2 Fc, and 10 Fc, with the cutoff frequency set to Fc.

表より、チェビシェフ・ローパスフィルタの減衰量は、他のパラメータが等しい場合、attp が大きくなるほど減衰量が増加する。

As can be seen from the table, the attenuation of the Chebyshev low-pass filter increases as attp increases, provided that other parameters are equal.

周波数が 2 倍になるごとに減衰量が 2 ～10 dB / 次 増加します。また周波数が 10 倍になるごとに減衰量が 15 ～ 25 dB / 次 増加します。

For every doubling of frequency, attenuation increases by 2 to 10 dB / order. For every tenfold increase in frequency, attenuation increases by 15 to 25 dB / order.

逆チェビシェフ・ローパスフィルタ Inverse Chebyshev low-pass filter

次数を入力する時 When entering the filter order

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Inv. Cheb
設計するフィルタの次数 m ($m \leq 58$)	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 $attp$	0.1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s / F_c$	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。 Enter the filter order m in "Line 1 m ".

「2 行目 F_c 」にカットオフ周波数 F_c を入力する。 Enter the cutoff frequency F_c in "Line 2 F_c ".

「3 行目 $attp$ 」に通過域のリップルを入力する。 Enter the passband ripple in "3rd line $attp$ ".

「4 行目 X_s 」に最低減衰量の周波数 F_s とカットオフ周波数 F_c の比 $X_s (=F_s / F_c)$ を入力する。

Enter the ratio $X_s (=F_s / F_c)$ between the frequencies F_s and F_c for which you want to check the attenuation in "Line 4 X_s ".

X_s で指定される周波数 F_s において最低減衰量に到達する伝達関数が計算される。

The transfer function that reaches the minimum attenuation at the frequency F_s specified by X_s is calculated.

注意: ここで設計に必要なパラメータは次数 m とカットオフ周波数 F_c と通過域のリップル $attp$ および最低減衰量に達する周波数 F_s と F_c の比 ($X_s=F_s / F_c$) の 4 個になります。

Note: The four parameters required for design here are the order m , the cutoff frequency F_c , the passband ripple $attp$, and the ratio ($X_s =F_s/F_c$) between the frequency F_s at which the minimum attenuation is reached and F_c .

設計仕様の入力後「OK」を押すと、ソフトウェア「LtAct」は設計仕様を満たすフィルタの伝達関数を計算して、伝達関数からローパスフィルタの周波数特性のグラフと周波数 $F_s=X_s \cdot F_c$ における最低減衰量 $atts$ などを表示して、フィルタの設計を完了します。

After entering the design specifications and pressing "OK," the software "LtAct" calculates the transfer function of a filter that meets the design specifications. It then displays the frequency response graph of the low-pass filter and the minimum attenuation at the cutoff frequency $F_s = X_s \cdot F_c$, completing the filter design.

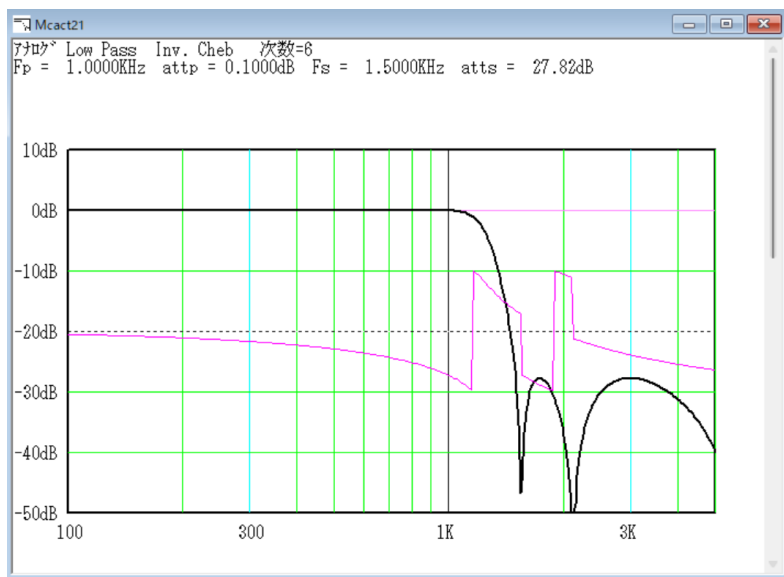
逆チェビシェフ・ローパスフィルタでは基本回路 LP3 または LP4 を選択できる。

The inverse Chebyshev low-pass filter allows selection of either the basic circuit LP3 or LP4.

Chebyshev low-pass filter

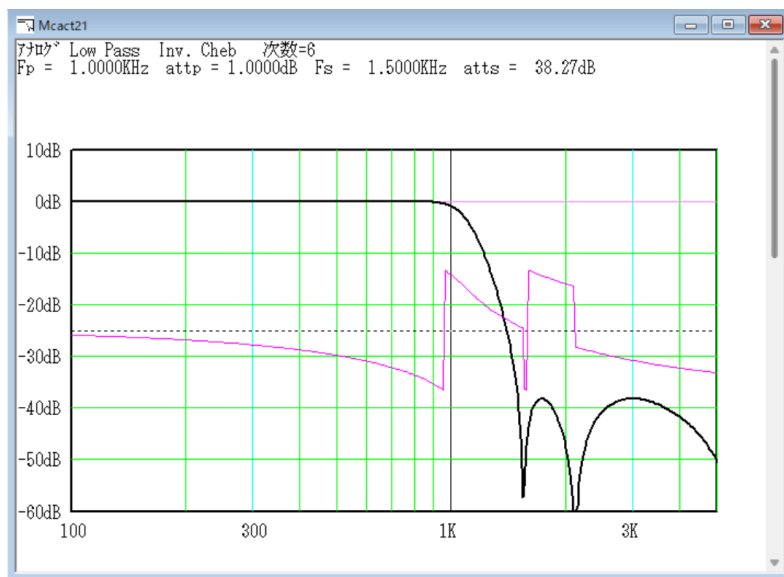
$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $\text{attp} = 0.1\text{dB}$, $X_s=1.5$ の場合の周波数特性。

Frequency response for $m=6$, $F_c=1\text{kHz}$, $\text{attp} = 0.1\text{dB}$, $X_s=1.5$.



$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $\text{attp} = 1\text{dB}$, $X_s=1.5$ の場合の周波数特性。

Frequency response for $m=6$, $F_c=1\text{kHz}$, $\text{attp} = 1\text{dB}$, $X_s=1.5$.



逆チェビシェフの attp はリップルではなくカットオフ周波数 F_c における減衰量を表わす。

The inverse Chebyshev attp does not represent the ripple but the attenuation at the cutoff frequency F_c .

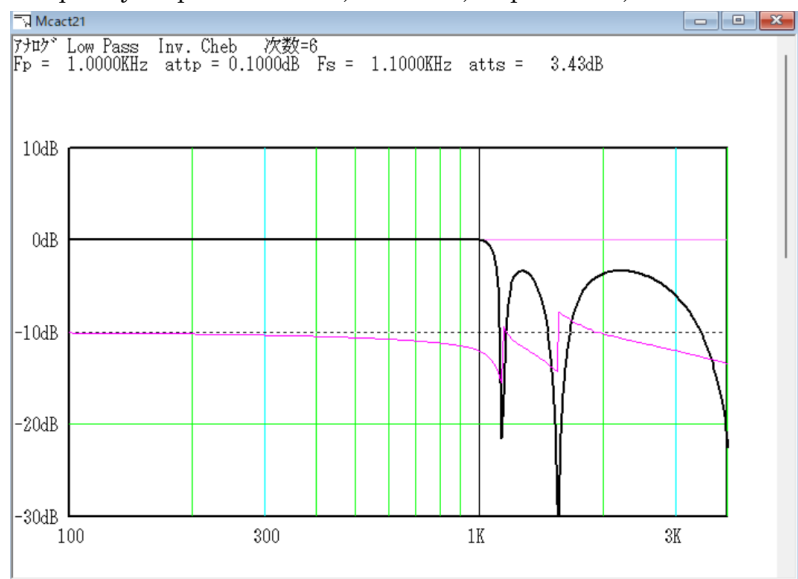
逆チェビシェフフィルタでは、 m 、 F_c 、 X_s が同一なら attp が大きい程、減衰量が増加する。

In an inverse Chebyshev filter, when m , F_c , and X_s are identical, the attenuation increases as attp becomes larger.

Chebyshev low-pass filter

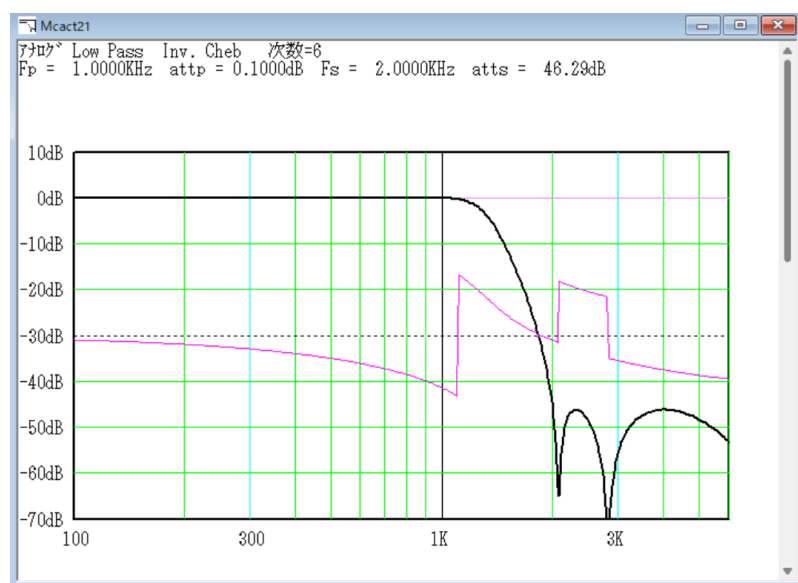
$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $\text{attp} = 0.1\text{dB}$, $X_s=1.1$ の場合の周波数特性。

Frequency response for $m=6$, $F_c=1\text{kHz}$, $\text{attp} = 0.1\text{dB}$, $X_s=1.1$.



$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $\text{attp} = 0.1\text{dB}$, $X_s=2$ の場合の周波数特性。

Frequency response for $m=6$, $F_c=1\text{kHz}$, $\text{attp} = 0.1\text{dB}$, $X_s=2$.



X_s で決定される周波数 F_s で最低減衰量に達することが確認できる。

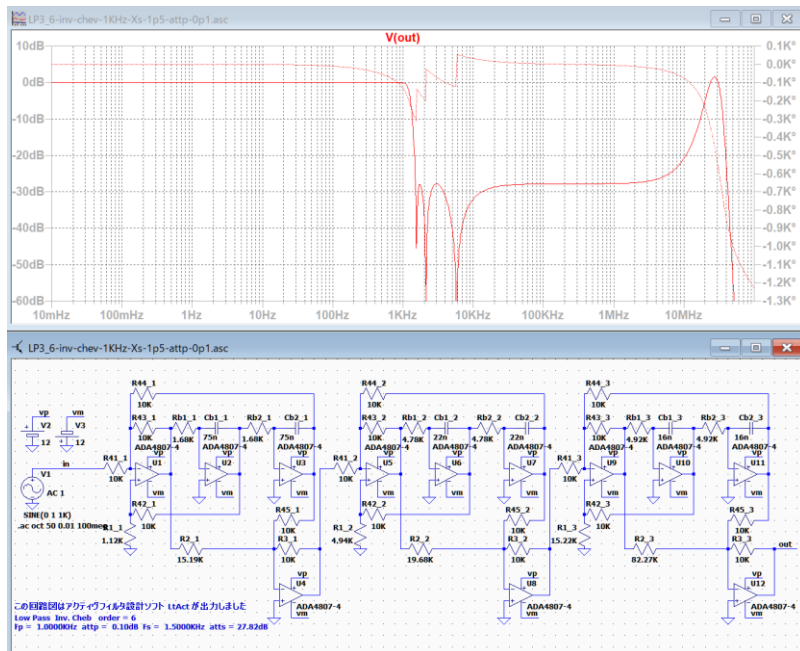
It can be seen that the minimum attenuation is reached at the frequency F_s determined by X_s .

逆チェビシェフフィルタでは、 m 、 F_c 、 attp が同一なら X_s が大きい程、減衰量が増加する。

In an inverse Chebyshev filter, when m , F_c , and attp are identical, the attenuation increases as X_s becomes larger.

逆チェビシェフ・ローパスフィルタの回路図 Inverse Chebyshev low-pass filter circuit diagram

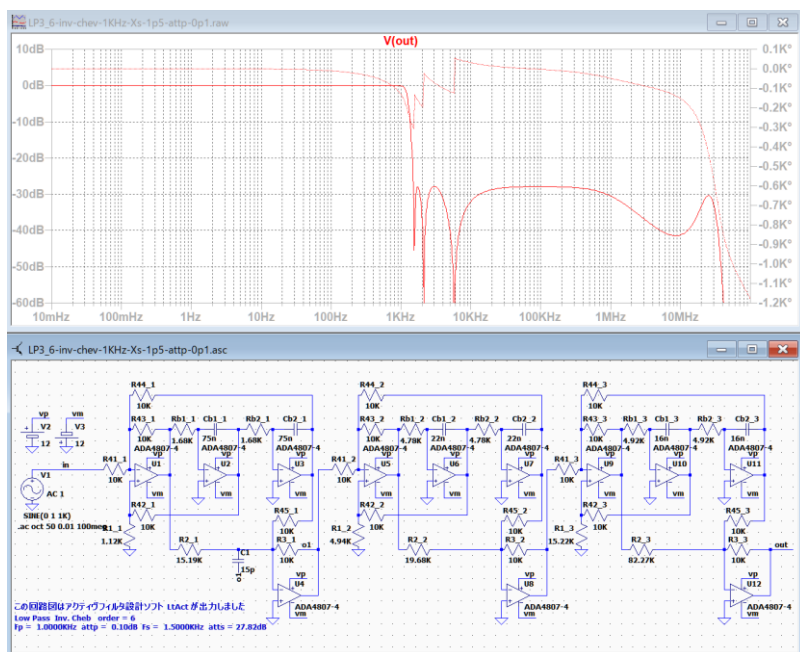
基本回路 LP3 を選択した場合 When selecting the basic circuit LP3



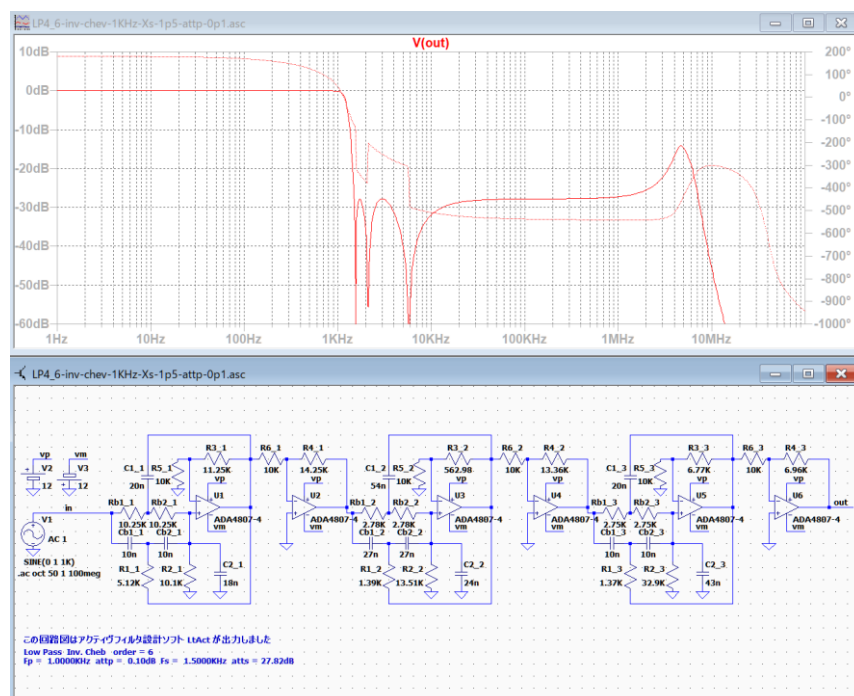
遮断域の高域にピークが見られる。R3_1 に C1 15p を並列接続するとピークが消える。

A peak is observed in the high-frequency range of the selected cutoff region of the basic circuit

LP3. Connecting a 15pF capacitor in parallel with R3_1 eliminates the peak.

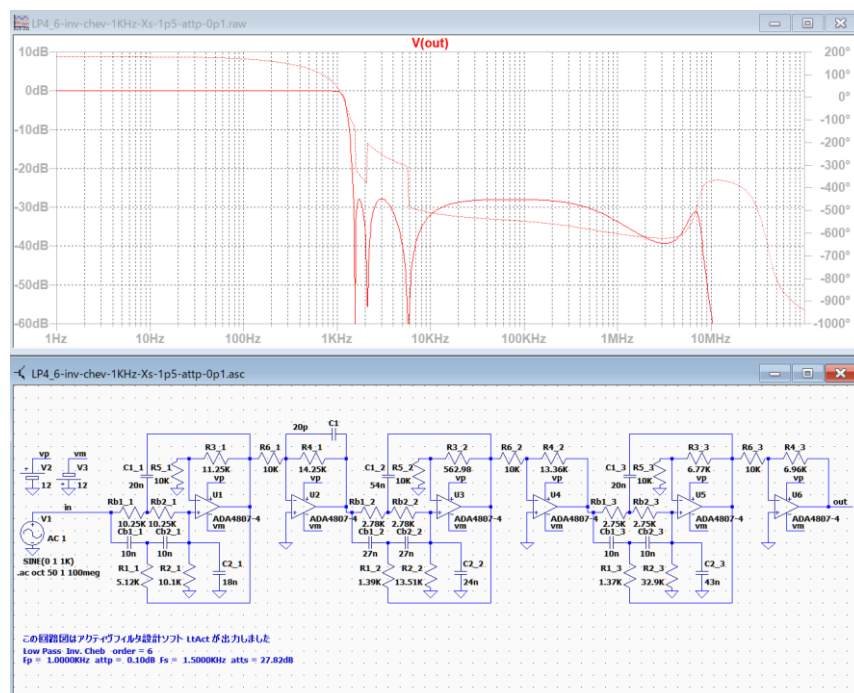


基本回路 LP4 を選択した場合 When selecting the basic circuit LP4



遮断域の高域にピークが見られる。R4_1 に C1 20p を並列接続するとピークが消える。

A peak is observed in the high-frequency range of the cutoff region. Connecting a 20pF capacitor in parallel with R4_1 eliminates the peak.



次数を入力しない時 When you do not enter the filter order

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 att_p 0.1 dB

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

周波数 F_s における減衰量 $atts$ 60 dB

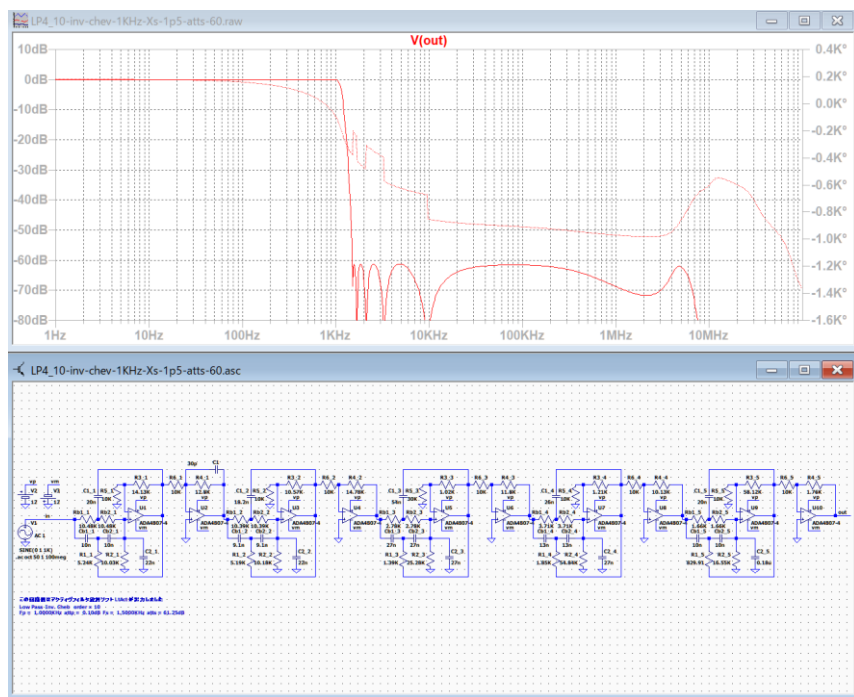
OK キャンセル

カットオフ周波数 F_p 1KHz、通過域のリプル 0.1dB、最低減衰量に到達する周波数 F_s と F_p の比 (F_s/F_p) $X_s=1.5$ 、最低減衰量 $atts=60$ dB としてフィルターを設計します。

The filter is designed with a cutoff frequency F_p of 1KHz, a passband ripple of 0.1dB, a ratio of the frequency F_s to F_p at which minimum attenuation is reached (F_s/F_p) $X_s=1.5$, and a minimum attenuation $atts=60$ dB.

フィルターは 10 次になり、1.5KHz における最低減衰量は 61.25dB > 60dB となります。

The filter is 10th order, and the minimum attenuation at 1.5KHz is 61.25dB > 60dB.



遮断域の高域に発生したピークは、R4_1 に C1 30p を並列接続して消しました。

The peak occurring in the high-frequency range of the cutoff region was eliminated by connecting C1 30p in parallel with R4_1.

次数を入力しない時 When you do not enter the filter order

Chebyshev low-pass filter

チェビシェフと逆チェビシェフの相違点 Difference between Chebyshev and Inverse Chebyshev

フィルタの次数が 6 次の伝達関数の係数を比較します。

Compare the coefficients of the transfer function when the filter order is 6th.

チェビシェフの場合の伝達関数の係数

Coefficients of the transfer function in the Chebyshev case

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

アナログ Low Pass Chebyshev 次数=6

Fp = 1.0000KHz attp = 0.1000dB Fs = 1.5000KHz atts = 27.82dB

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	1.4413K	44.5864Meg	0	0	44.5864Meg
	Fc= 1.0627KHz Fc ゲイン= 13.3171 dB Q = 4.6329 GB 積=492.3506KHz				
2	3.9376K	27.4917Meg	0	0	27.4917Meg
	Fc= 834.4905 Hz Fc ゲイン= 2.4873 dB Q = 1.3316 GB 積=111.1183KHz				
3	5.3789K	10.3971Meg	0	0	10.3971Meg
	Fc= 513.1876 Hz Fc ゲイン= - 4.4448 dB Q = 0.5995 GB 積= 30.7635KHz				

逆チェビシェフの場合の伝達関数の係数

Coefficients of the transfer function in the case of the inverse Chebyshev function

+++++++ 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 Inv. Cheb 次数=6

Fp = 1.0000KHz attp = 0.1000dB Fs = 1.5000KHz atts = 27.82dB

2 次式

n	Pn_0	Pn_1	Pn_2	Pn_3	Pn_4
1	2.3953K	62.6817Meg	0.6584	0	62.6817Meg
	Fc= 1.2601KHz Fc ゲイン= 1.0547 dB Q = 3.3053 GB 積=416.4878KHz				
2	9.4235K	90.2626Meg	0.5081	0	90.2626Meg
	Fc= 1.5121KHz Fc ゲイン= - 6.0914 dB Q = 1.0082 GB 積=152.4451KHz				
3	22.9877K	161.1870Meg	0.1216	0	161.1870Meg
	Fc= 2.0206KHz Fc ゲイン= - 6.2823 dB Q = 0.5523 GB 積=111.5976KHz				

Chebyshev low-pass filter

それぞれの伝達関数 each transfer function

チェビシェフの場合 The Chebyshev Case

$$H_6(\omega_{ck}, s) = \frac{44.5864Meg}{s^2 + 1.4413K \cdot s + 44.5864Meg} \cdot \frac{27.4917Meg}{s^2 + 3.9376K \cdot s + 27.4917Meg} \cdot \frac{10.3971Meg}{s^2 + 5.3789K \cdot s + 10.3971Meg}$$

逆チェビシェフの場合 The Inverse Chebyshev Case

$$H_6(\omega_{ck}, s) = \frac{0.6584 \cdot s^2 + 62.6817Meg}{s^2 + 2.3953K \cdot s + 62.6817Meg} \cdot \frac{0.5081 \cdot s^2 + 90.2626Meg}{s^2 + 9.4235K \cdot s + 90.2626Meg} \cdot \frac{0.1216 \cdot s^2 + 161.1870Meg}{s^2 + 22.9877K \cdot s + 161.1870Meg}$$

$$= \frac{62.6817Meg \cdot (10.5039n \cdot s^2 + 1)}{s^2 + 2.3953K \cdot s + 62.6817Meg} \cdot \frac{90.2626Meg \cdot (5.62913n \cdot s^2 + 1)}{s^2 + 9.4235K \cdot s + 90.2626Meg} \cdot \frac{161.1870Meg \cdot (0.754403n \cdot s^2 + 1)}{s^2 + 22.9877K \cdot s + 161.1870Meg}$$

伝達関数の係数はチェビシェフと逆チェビシェフで全く異なります。1 段目の GB 積を比較すると逆チェビシェフの方が数値が小さくなっているので、安定な動作が期待できると思います。

The coefficients of the transfer function differ significantly between Chebyshev and inverse Chebyshev. Comparing the first-stage GB product, the inverse Chebyshev yields smaller values, suggesting more stable operation can be expected.

参考：P22 のバターワース・ローパスフィルタの伝達関数では、3 つのブロックのカットオフ周波数が同じ値でした。

Note: In the transfer function of the P22 Butterworth low-pass filter, the cutoff frequencies of the three blocks were the same.

$$H_6(\omega_{ck}, s) = \frac{39.4784Meg}{s^2 + 3.2524K \cdot s + 39.4784Meg} \cdot \frac{39.4784Meg}{s^2 + 8.8858K \cdot s + 39.4784Meg} \cdot \frac{39.4784Meg}{s^2 + 12.1382K \cdot s + 39.4784Meg}$$

上で示したように、(逆)チェビシェフ・ローパスフィルタの伝達関数では 3 つのブロックのカットオフ周波数が異なる値です。楕円関数でも異なる値になります。

As shown above, the cutoff frequencies of the three blocks in the (inverse) Chebyshev low-pass filter transfer function are different values. The elliptic functions also have different values.

チェビシェフと逆チェビシェフの相違点 Difference between Chebyshev and Inverse Chebyshev

急峻な減衰特性を設計する Design steep attenuation characteristics

逆チェビシェフ・フィルタはチェビシェフ・フィルタと遮断特性が同等なので、「次数を入力する時」の入力方法で次数を 32 次、 $X_s = 1.05$ に設定します。

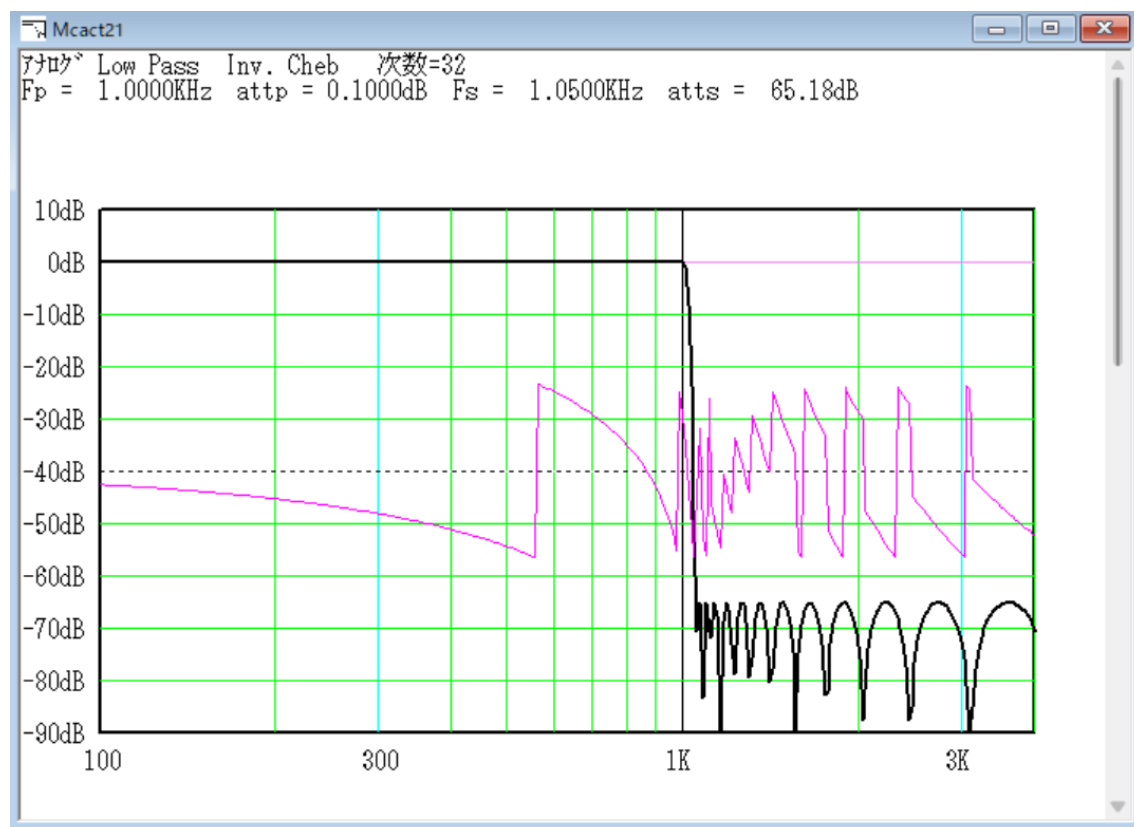
Since the inverse Chebyshev filter has equivalent cutoff characteristics to the Chebyshev filter, set the order to 32nd order and $X_s = 1.05$ using the input method for “when entering the order.”

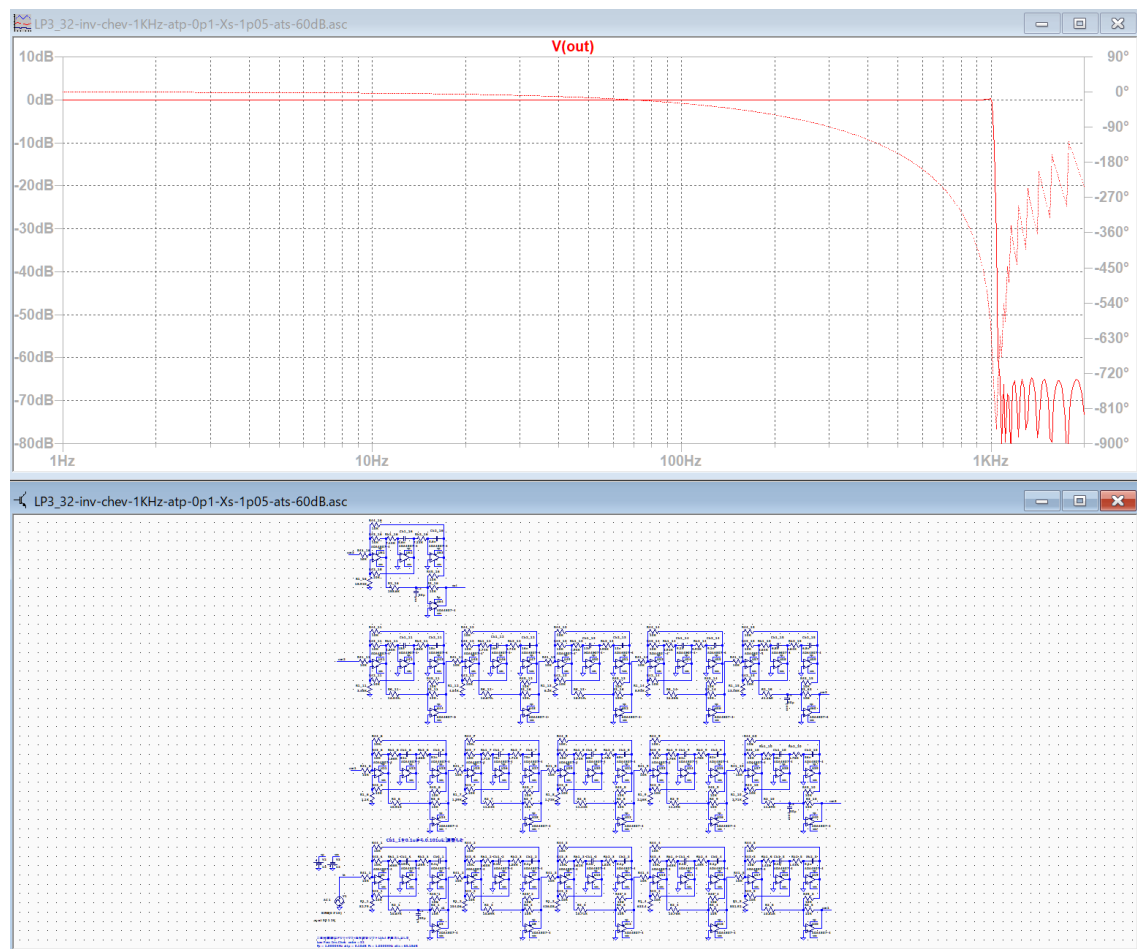
設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Inv. Cheb
設計するフィルタの次数 $m(<=58)$		32	
カットオフ周波数 F_c		1	KHz
周波数 F_c における減衰量又はリップル att_p		0.1	dB
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$		1.05	倍

チェビシェフの時と同様に、1.05KHz の減衰量が 65.18dB > 60dB になります。

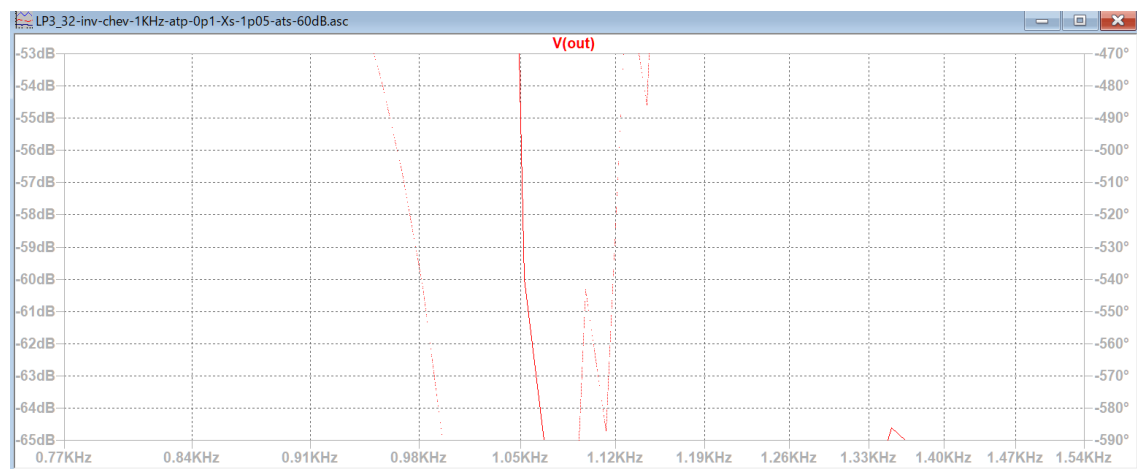
As with Chebyshev's case, the attenuation at 1.05 kHz becomes 65.18 dB > 60 dB.





1.053KHz で減衰量が 60dB に達することが確認できます。

At 1.053 kHz, attenuation reaches 60 dB.



フィルターの次数と周波数ごとの減衰量 Filter order and attenuation for each frequency

「次数を入力する」で、逆チェビシェフ・ローパスフィルターの次数が 2 次、6 次、10 次の場合を設計して、周波数ごとに減衰量がどのように変化するかを確認して表を作成しました。

In "Entering the Order," we designed Chebyshev low-pass filters with orders of 2nd, 6th, and 10th, and created a table to check how the attenuation changes with frequency.

減衰量の測定方法 How to measure attenuation

「次数を入力する時」の入力方法で、次数を 2、カットオフ周波数を 1KHz、attp=0.1dB、Xs=1.1 と入力して「OK」を押します。

Using the "When entering the order" input method, enter the order as 2, the cutoff frequency as 1KHz, attp=0.1dB, and Xs=1.1, then press "OK."

設計パラメータの入力

フィルタの種類 ローパスフィルタ 遮断特性 Inv. Cheb

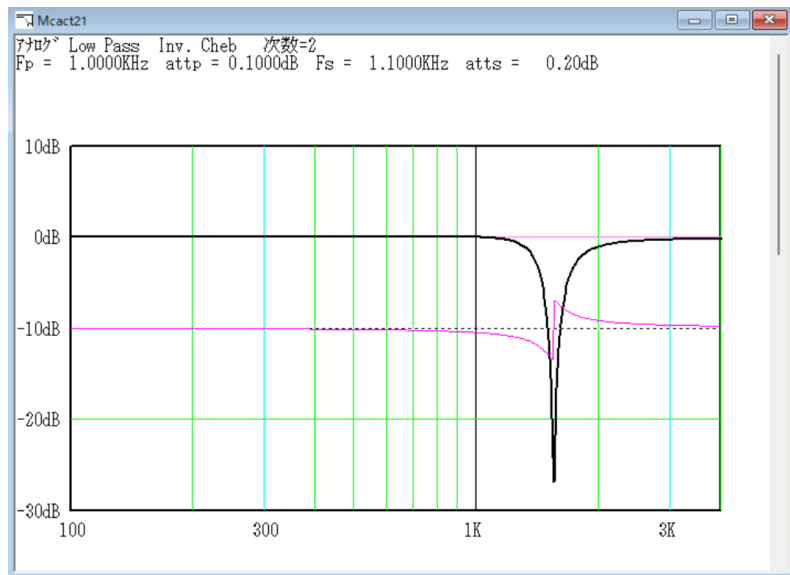
設計するフィルタの次数 $m(\leq 58)$ 2

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、 $X_s = F_s / F_c$ 1.1 倍

OK キャンセル



グラフの上部に表示された情報から、 $F_c=1\text{KHz}$ の減衰量は 0.1dB、 $F_s=1.1\text{KHz}$ の減衰量は 0.2dB と確認できます。 $F=0\text{Hz}$ の減衰量はグラフから、0dB とします。

From the information displayed at the top of the graph, we can see that the attenuation for $F_c=1\text{KHz}$ is 0.1dB, and the attenuation for $F_s=1.1\text{KHz}$ is 0.2dB. From the graph, we can see that the attenuation for $F=0\text{Hz}$ is 0dB.

Chebyshev low-pass filter

周波数 F の減衰量は $F=0$ 、 F_c 、 $1.1 F_c$ に対して 0, 0.1, 0.2dB と求められます。

The attenuation of frequency F is calculated as 0, 0.1, 0.2dB for $F=0$, F_c , $1.1 F_c$.

次に、 $X_s=1.5, 2, 10$ に対する設計を行います。

Next, we will design for $X_s=1.5, 2, 10$.

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Inv. Cheb
設計するフィルタの次数 $m(<=58)$	2		
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、 $X_s = F_s/F_c$	1.5	倍	キャンセル

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Inv. Cheb
設計するフィルタの次数 $m(<=58)$	2		
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、 $X_s = F_s/F_c$	2	倍	キャンセル

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Inv. Cheb
設計するフィルタの次数 $m(<=58)$	2		
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、 $X_s = F_s/F_c$	10	倍	キャンセル

このようにして、 $F=1.5 F_c$ 、 $2 F_c$ 、 $10 F_c$ に対して 1.09, 3.31, 29.65dB と求められます。

In this way, we get 1.09, 3.31, and 29.65dB for $F=1.5 F_c$, $2 F_c$, and $10 F_c$.

Chebyshev low-pass filter

次に、次数を 2、カットオフ周波数を 1KHz、attp=1dB と入力して、Xs=1.1, 1.5, 2 および 10 の設計を行います。

Next, enter the order as 2, the cutoff frequency as 1KHz, and attp=1dB, and design Xs=1.1, 1.5, 2, and 10.

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Inv. Cheb
設計するフィルタの次数 $m(<=58)$	2		
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	1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$	1.1	倍	キャンセル

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Inv. Cheb
設計するフィルタの次数 $m(<=58)$	2		
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	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

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Inv. Cheb
設計するフィルタの次数 $m(<=58)$	2		
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	1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$	2	倍	キャンセル

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Inv. Cheb
設計するフィルタの次数 $m(<=58)$	2		
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	1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$	10	倍	キャンセル

Chebyshev low-pass filter

それから、次数が 6 と 10 についても同様の設計を行って減衰量をまとめると下表が得られます。

Then, by performing a similar design for orders 6 and 10 and summarizing the attenuation amounts, we obtain the table below.

逆チェビシェフ・ローパスフィルタの減衰量(dB) リプルが 0.1dB の場合

周波数/次数	0	Fc	1.1 Fc	1.5 Fc	2 Fc	dB/oct/order	10 Fc	dB/dec/order
2	0	0	0.20	1.09	3.31	1.66	29.65	14.83
6	0	0	3.43	27.82	46.29	7.72	133.64	22.27
10	0	0	16.28	61.25	92.04	9.20	237.64	23.76

逆チェビシェフ・ローパスフィルタの減衰量(dB) リプルが 1dB の場合

周波数/次数	0	Fc	1.1 Fc	1.5 Fc	2 Fc	dB/oct/order	10 Fc	dB/dec/order
2	0	1	1.82	6.20	11.36	5.68	40.11	20.06
6	0	1	11.58	38.27	56.74	9.46	144.10	24.02
10	0	1	26.65	71.71	102.50	10.25	248.10	24.81

通過域のリプルが 0.1dB と 1dB の場合について、カットオフ周波数を Fc として、周波数が 0Hz, 1.1 Fc, 1.5 Fc, 2 Fc および 10 Fc の減衰量(dB)を測定しました。

For passband ripples of 0.1dB and 1dB, the attenuation (dB) was measured at frequencies of 0Hz, 1.1 Fc, 1.5 Fc, 2 Fc, and 10 Fc, with the cutoff frequency set to Fc.

表より、逆チェビシェフ・ローパスフィルタの減衰量は、他のパラメータが等しい場合、attp が大きくなるほど減衰量が増加する。

As can be seen from the table, the attenuation of the Chebyshev low-pass filter increases as attp increases, provided that other parameters are equal.

周波数が 2 倍になるごとに減衰量が 2 ～10 dB / 次 増加します。また周波数が 10 倍になるごとに減衰量が 15 ～25 dB / 次 増加します。

For every doubling of frequency, attenuation increases by 2 to 10 dB / order. For every tenfold increase in frequency, attenuation increases by 15 to 25 dB / order.

減衰量はチェビシェフ・ローパスフィルタと同じ値です。

The attenuation is the same as that of a Chebyshev low-pass filter.

楕円関数・ローパスフィルタ Elliptic Function Low-Pass Filter

次数を入力する時 When entering the filter order

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 ($m \leq 58$)	6		
カットオフ周波数 F_c	1	KHz	
周波数 F_c における減衰量又はリプル atp	0.1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$	1.5	倍	キャンセル

「1 行目 m 」にフィルタの次数 m を入力する。 Enter the filter order m in "Line 1 m ".

「2 行目 F_c 」にカットオフ周波数 F_c を入力する。 Enter the cutoff frequency F_c in "Line 2 F_c ".

「3 行目 atp 」に通過域のリプルを入力する。 Enter the passband ripple in "3rd line atp ".

「4 行目 X_s 」に最低減衰量の周波数 F_s とカットオフ周波数 F_c の比 $X_s (=F_s / F_c)$ を入力する。

Enter the ratio $X_s (=F_s / F_c)$ between the frequencies F_s and F_c for which you want to check the attenuation in "Line 4 X_s ".

X_s で指定される周波数 F_s において最低減衰量に到達する伝達関数が計算される。

The transfer function that reaches the minimum attenuation at the frequency F_s specified by X_s is calculated.

注意：ここで設計に必要なパラメータは次数 m とカットオフ周波数 F_c と通過域のリプル atp および最低減衰量に達する周波数 F_s と F_c の比 ($X_s=F_s / F_c$) の 4 個になります。

Note: The four parameters required for design here are the order m , the cutoff frequency F_c , the passband ripple atp , and the ratio ($X_s =F_s/F_c$) between the frequency F_s at which the minimum attenuation is reached and F_c .

設計仕様の入力後「OK」を押すと、ソフトウェア「LtAct」は設計仕様を満たすフィルタの伝達関数を計算して、伝達関数からローパスフィルタの周波数特性のグラフと周波数 $F_s=X_s \cdot F_c$ における最低減衰量 $atts$ などを表示して、フィルタの設計を完了します。

After entering the design specifications and pressing "OK," the software "LtAct" calculates the transfer function of a filter that meets the design specifications. It then displays the frequency response graph of the low-pass filter and the minimum attenuation at the cutoff frequency $F_s = X_s \cdot F_c$, completing the filter design.

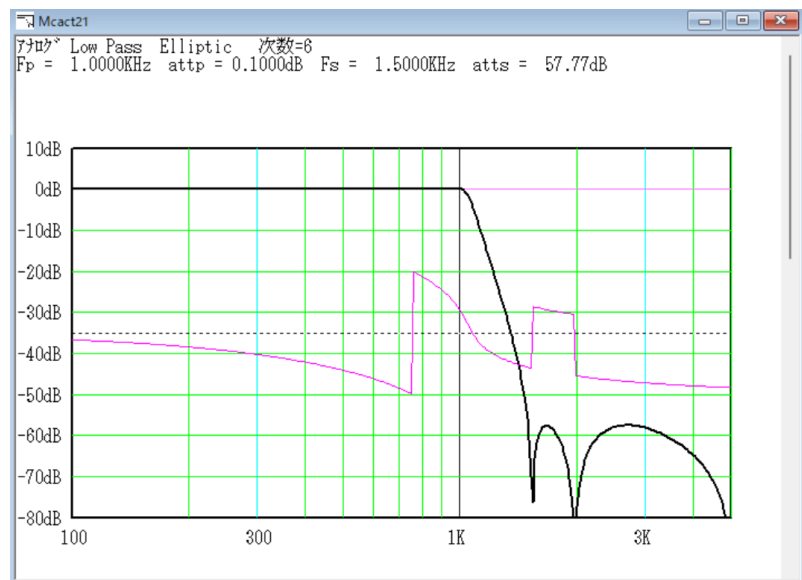
楕円関数・ローパスフィルタでは基本回路 LP3 または LP4 を選択できる。

The inverse Chebyshev low-pass filter allows selection of either the basic circuit LP3 or LP4.

Function Low-Pass Filter

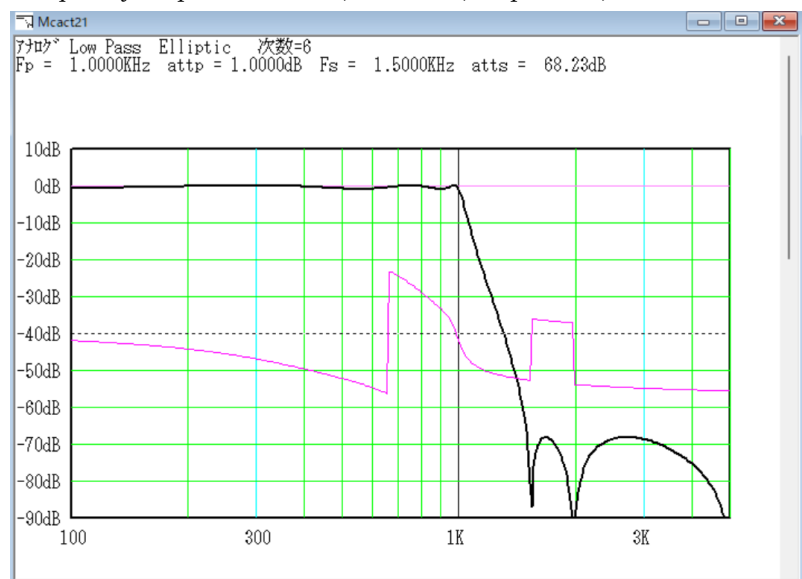
$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $\text{attp} = 0.1\text{dB}$, $X_s=1.5$ の場合の周波数特性。

Frequency response for $m=6$, $F_c=1\text{kHz}$, $\text{attp} = 0.1\text{dB}$, $X_s=1.5$.



$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $\text{attp} = 1\text{dB}$, $X_s=1.5$ の場合の周波数特性。

Frequency response for $m=6$, $F_c=1\text{kHz}$, $\text{attp} = 1\text{dB}$, $X_s=1.5$.



楕円関数ではチェビシェフと同様に通過域にリプルが発生します。

Elliptic functions produce ripples in the passband, just like Chebyshev.

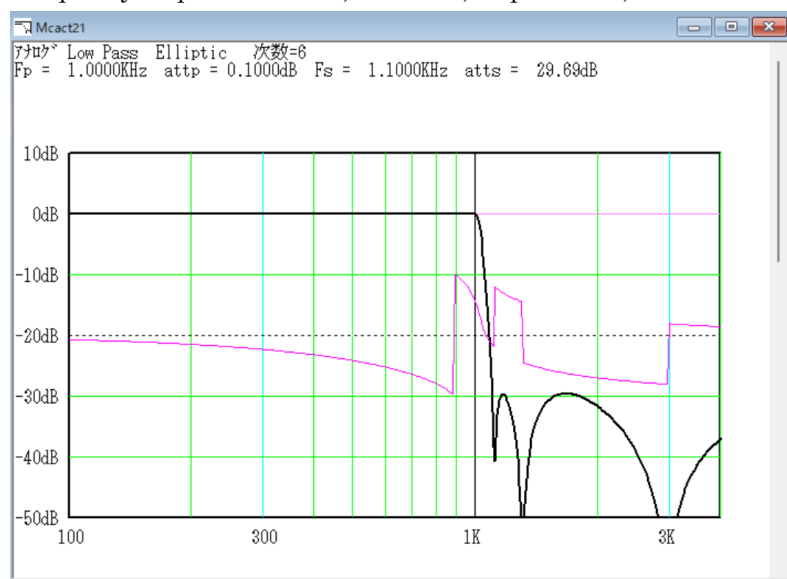
楕円関数フィルタでは、 m 、 F_c 、 X_s が同一なら attp が大きい程、減衰量が増加します。

In an inverse Chebyshev filter, when m , F_c , and X_s are identical, the attenuation increases as attp becomes larger.

Function Low-Pass Filter

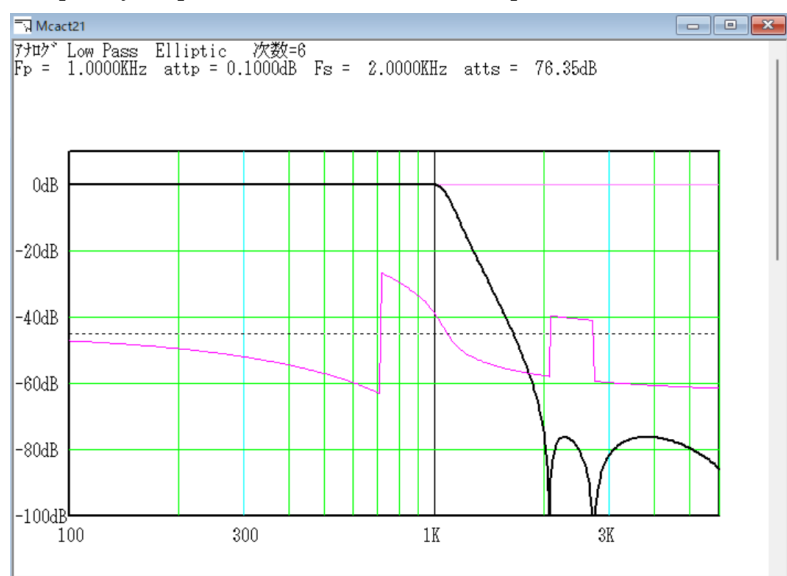
$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $\text{attp} = 0.1\text{dB}$, $X_s=1.1$ の場合の周波数特性。

Frequency response for $m=6$, $F_c=1\text{kHz}$, $\text{attp} = 0.1\text{dB}$, $X_s=1.1$.



$m=6$, $F_c=1\text{KHz}$, $\text{attp} = 0.1\text{dB}$, $X_s=2$ の場合の周波数特性。

Frequency response for $m=6$, $F_c=1\text{kHz}$, $\text{attp} = 0.1\text{dB}$, $X_s=2$.



X_s で指定される周波数 F_s で最低減衰量に達することが確認できる。

It can be confirmed that the minimum attenuation is reached at the frequency F_s specified by X_s .

楕円関数フィルタでは、 m 、 F_c 、 attp が同一なら X_s が大きい程、減衰量が増加する。

For elliptic filters, when m , F_c , and attp are identical, the attenuation increases as X_s increases.

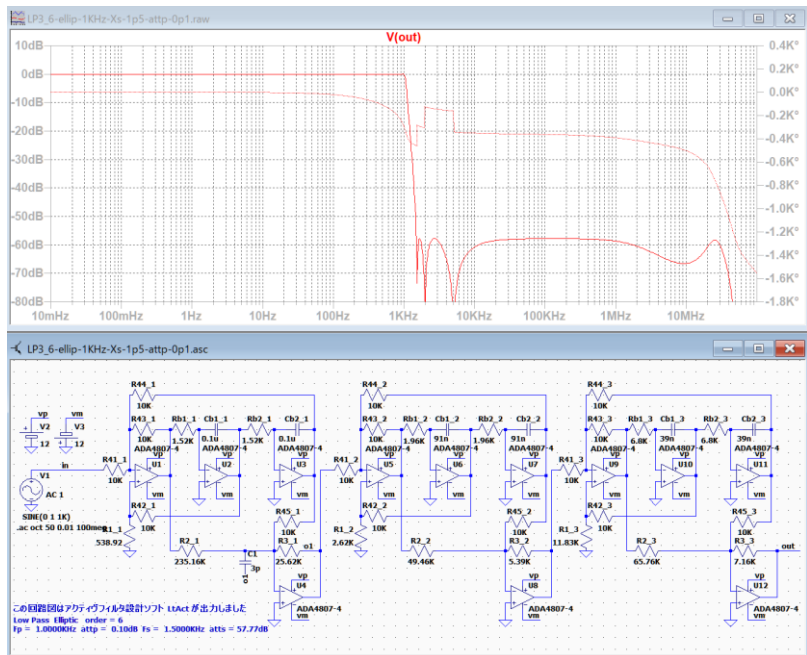
楕円関数・ローパスフィルタ Elliptic

楕円関数・ローパスフィルタの回路図 Elliptic function low-pass filter circuit diagram

The screenshot displays the LTspice simulation environment. The top window shows a Bode plot titled "LP3_5-ellip-1KHz-Xs-1p5-attp-Op1.asc". The plot shows the magnitude response (red line) and phase response (blue line) of the filter. The magnitude plot has a passband flat at 0dB, a sharp roll-off starting around 1kHz, and a stopband attenuation of approximately -1.6KdB at 10MHz. The phase plot shows a phase shift from 0 to -180 degrees. The bottom window shows the circuit schematic for the filter, which is a 5th-order Butterworth low-pass filter. It consists of five op-amp stages (ADA4807-4) configured as active low-pass filters. The components include resistors (R1-R12, R44-R46), capacitors (C1-C3, C4-C6), and a voltage source (V1). The schematic is labeled with component values and node numbers. Below the schematic, there is a text box containing the following information:

この回路図はアクティブフィルタ設計ソフト LTact が出力しました
 Low Pass Butter order = 6
 fp = 1.00000kHz attp = 0.10dB fs = 1.50000kHz atts = 57.77dB

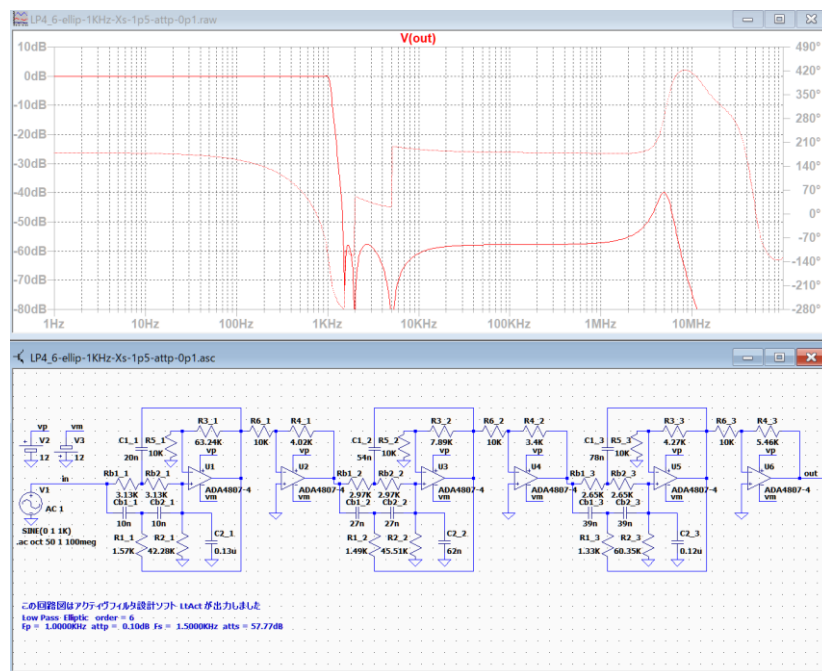
A peak is observed in the high-frequency range of the selected cutoff region of the basic circuit LP3. Connecting a 15pF capacitor in parallel with R3_1 eliminates the peak.



76 / 132

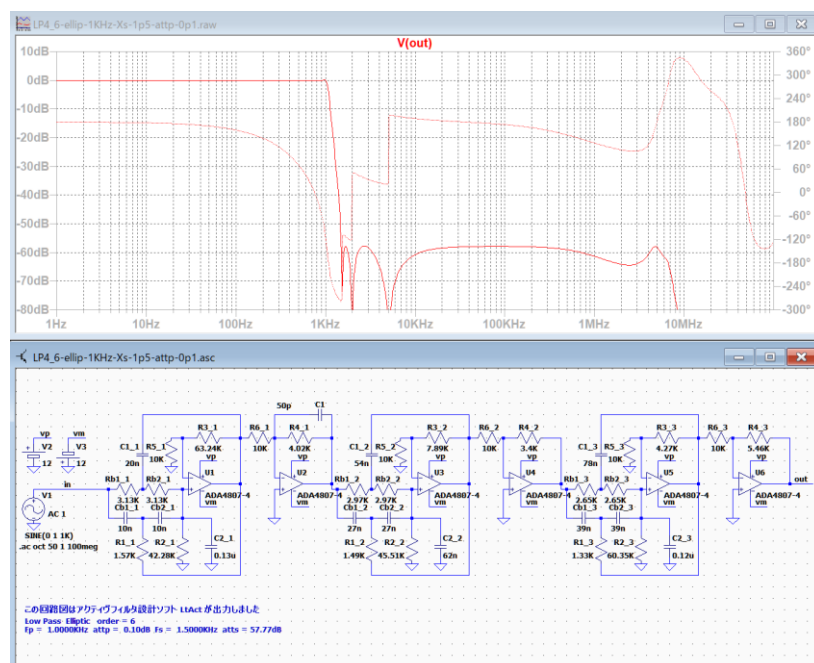
Function Low-Pass Filter

基本回路 LP4 を選択した場合 When selecting the basic circuit LP4



遮断域の高域にピークが見られる。R4_1 に C1 50p を並列接続するとピークが消える。

A peak is observed in the high-frequency range of the cutoff region. Connecting a 50pF capacitor in parallel with R4_1 eliminates the peak.



次数を入力しない時 When you do not enter the filter order

設計パラメータの入力

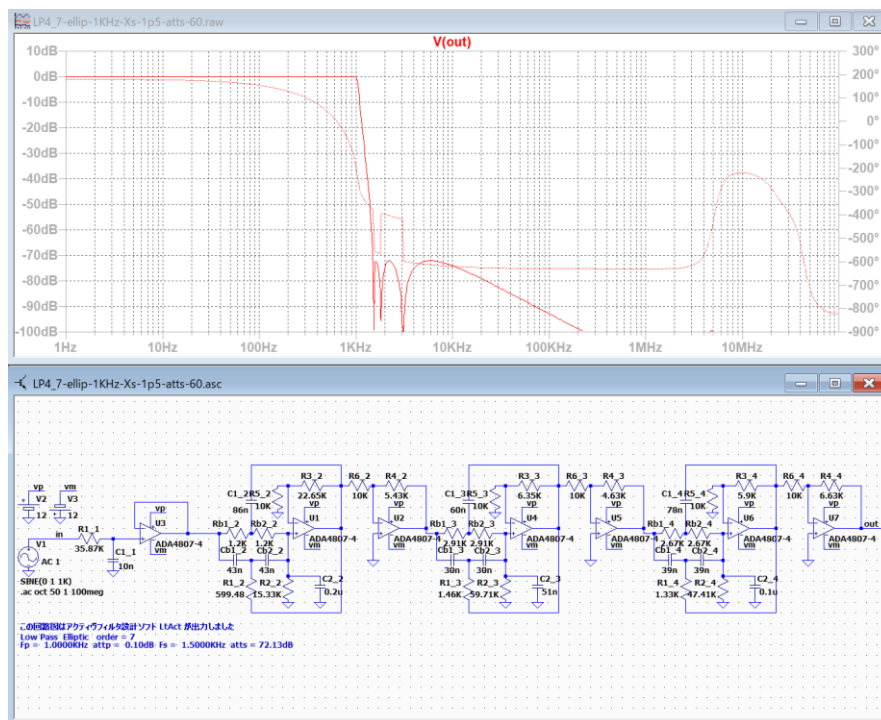
フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Elliptic
カットオフ周波数 F_p	1	KHz	
周波数 F_p における減衰量又はリプル att_p	0.1	dB	
減衰量を指定する周波数を F_s として, $X_s = F_s/F_p$	1.5	倍	OK
周波数 F_s における減衰量 $atts$	60	dB	キャンセル

カットオフ周波数 F_p 1KHz、通過域のリプル 0.1dB、最低減衰量に到達する周波数 F_s と F_p の比 $X_s(F_s/F_p)=1.5$ 、最低減衰量 $atts=60\text{dB}$ としてフィルターを設計します。

The filter is designed with a cutoff frequency F_p of 1KHz, a passband ripple of 0.1dB, a ratio of the frequency F_s to F_p at which minimum attenuation is reached $X_s(F_s/F_p)=1.5$, and a minimum attenuation $atts=60\text{dB}$.

フィルターの次数は 7 次になり、1.5KHz における最低減衰量は $72.13\text{dB} > 60\text{dB}$ となります。

The filter order is 10th order, and the minimum attenuation at 1.5KHz is $72.13\text{dB} > 60\text{dB}$.



初段に 1 次のローパスフィルタがあるので、遮断域の高域にピークは発生しませんでした。

Since there is a first-order low-pass filter in the first stage, no peaks occur in the high frequency range of the cutoff frequency.

次数を入力しない時 When you do not enter the filter order

急峻な減衰特性を設計する Design steep attenuation characteristics

楕円関数・フィルタは(逆)チェビシェフ・フィルタよりも遮断特性が優れているので、チェビシェフの時よりも小さい値 $X_s = 1.01$ に設定してみる。

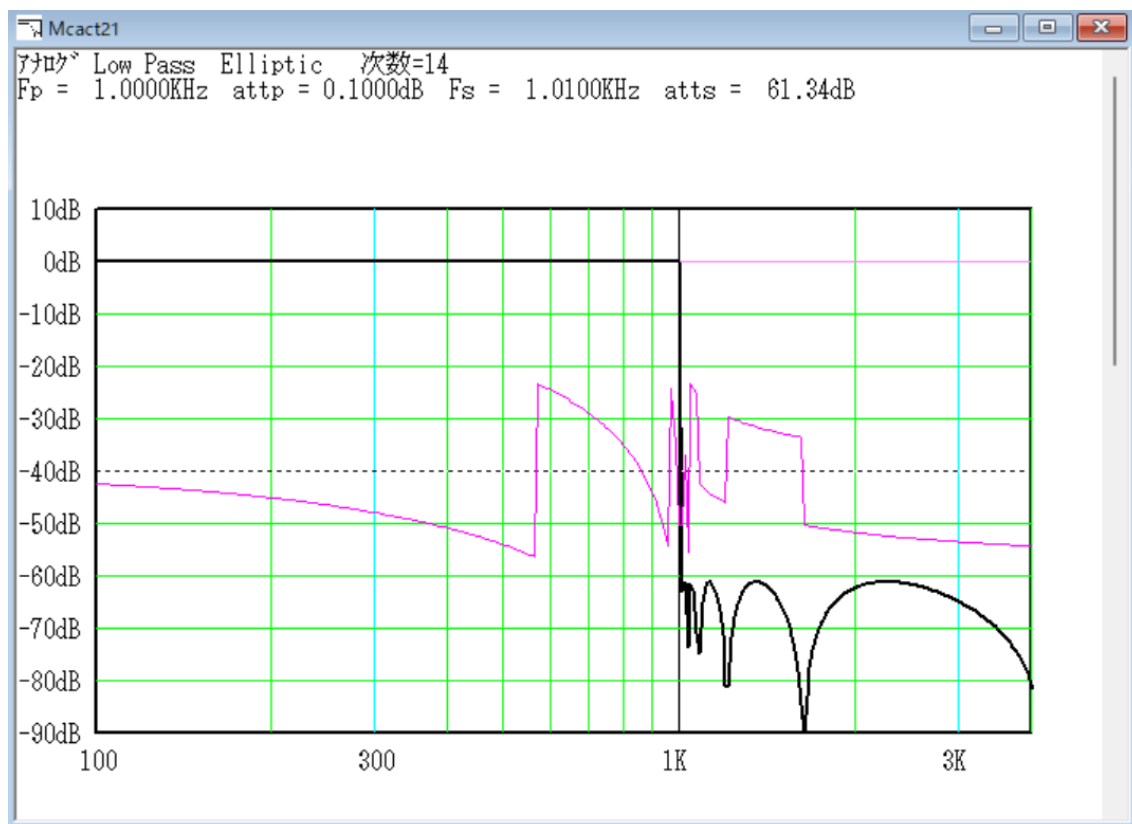
Elliptic filters exhibit superior cutoff characteristics compared to (inverse) Chebyshev filters, so we set $X_s = 1.01$, a smaller value than for Chebyshev filters.

設計パラメータの入力

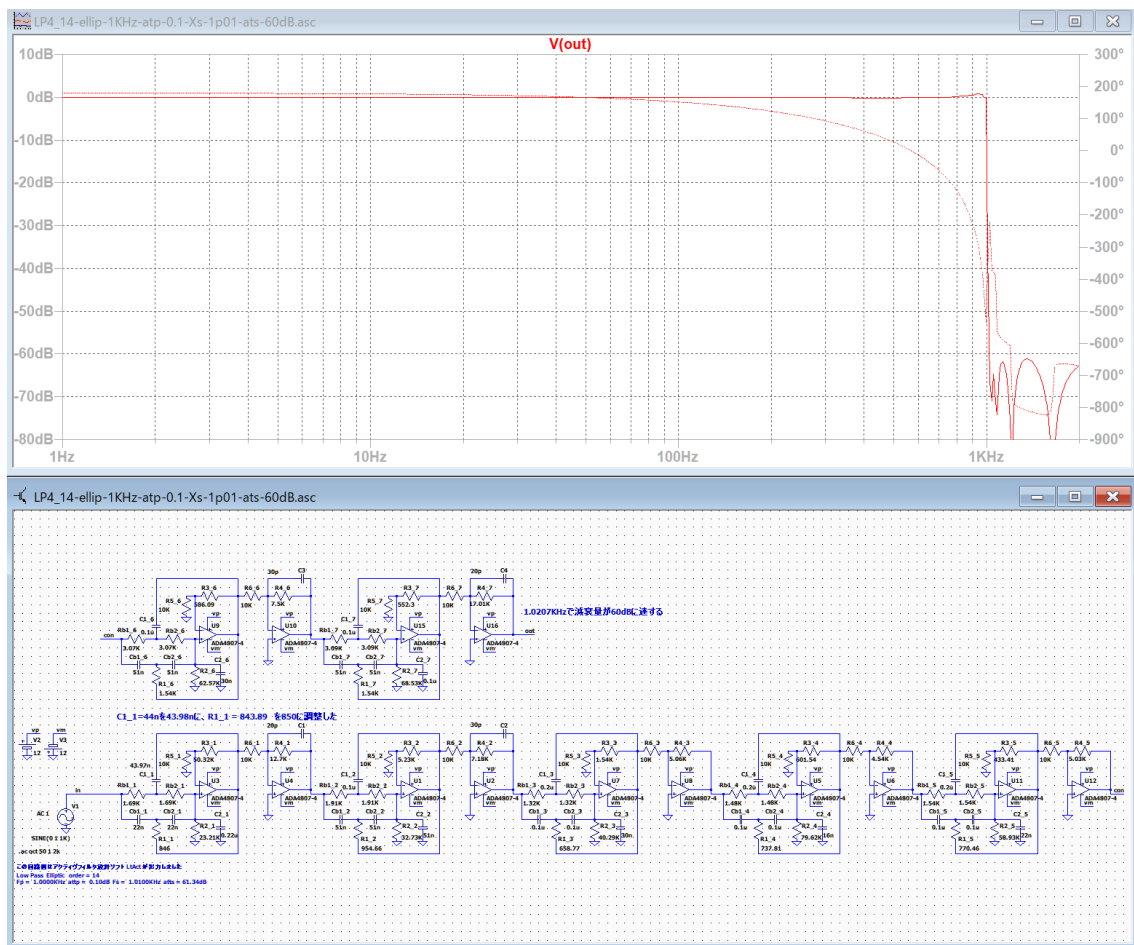
フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Elliptic
カットオフ周波数 F_p	1	KHz	
周波数 F_p における減衰量又はリップル att_p	0.1	dB	
減衰量を指定する周波数を F_s として, $X_s = F_s/F_p$	1.01	倍	OK
周波数 F_s における減衰量 $atts$	60	dB	キャンセル

フィルタの次数は 14 次決定され、1.01KHz の減衰量が 61.34dB > 60dB になる。

The filter order is set to 14th order, achieving an attenuation of 61.34 dB at 1.01 kHz, exceeding the 60 dB requirement.

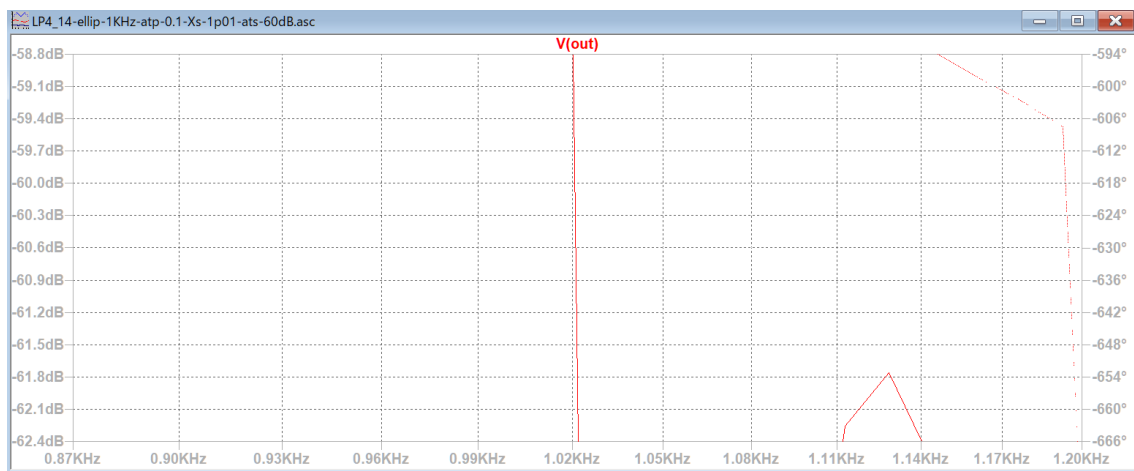


Function Low-Pass Filter



1.021KHz で減衰量が 60dB に達することが確認できる。

At 1.021 kHz, attenuation reaches 60 dB.



Function Low-Pass Filter

$X_s=1.01$ で、 $F_s=1\text{kHz}$ の減衰量を 60dB 以上とする設計 Design to achieve attenuation of 60 dB or more at $F_s = 1\text{ kHz}$ with $X_s = 1.01$

$X_s=F_s/F_p$ より、カットオフ周波数 F_p を $F_p=F_s/X_s=1\text{kHz}/1.01=0.99\text{kHz}$ に設定する。

From $X_s = F_s/F_p$, the cutoff frequency F_p is set to $F_p = X_s/F_s = 1\text{ kHz}/1.01 = 0.99\text{ kHz}$.

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 990 Hz

周波数 F_p における減衰量又はリプル attp 0.1 dB

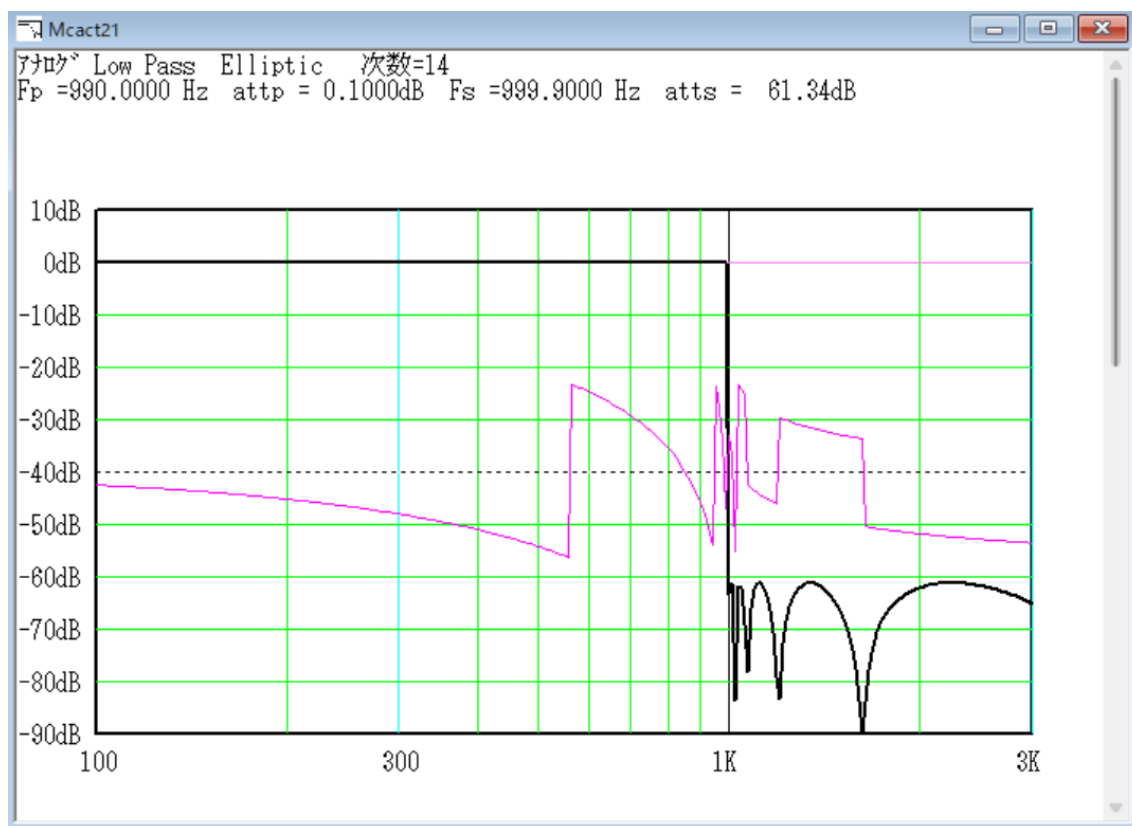
減衰量を指定する周波数を F_s として, $X_s = F_s/F_p$ 1.01 倍

周波数 F_s における減衰量 atts 60 dB

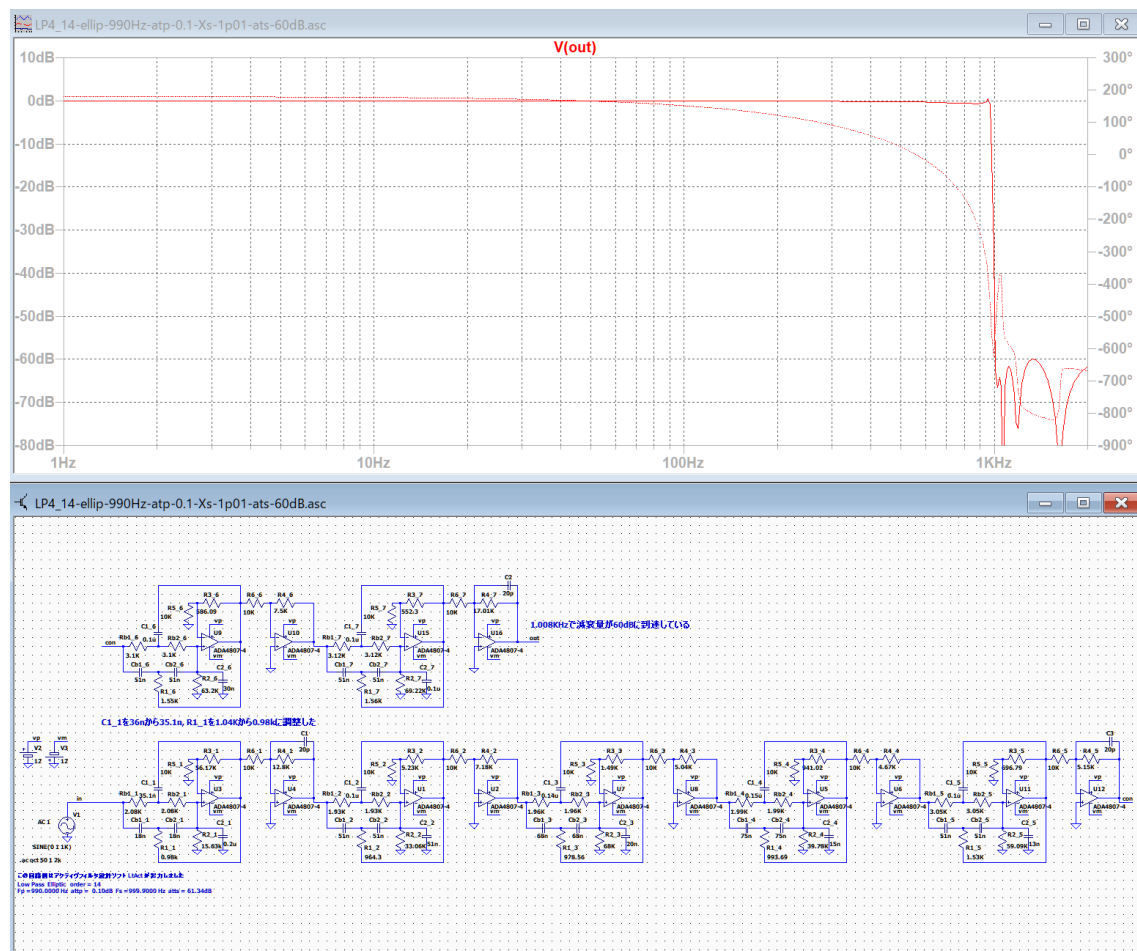
OK Cancel

フィルタの次数は 14 次、カットオフ周波数は 990Hz で 999.9Hz の減衰量が 60dB に達する。

The filter has a 14th-order response, with a cutoff frequency of 990 Hz and a 60 dB attenuation at 999.9 Hz.

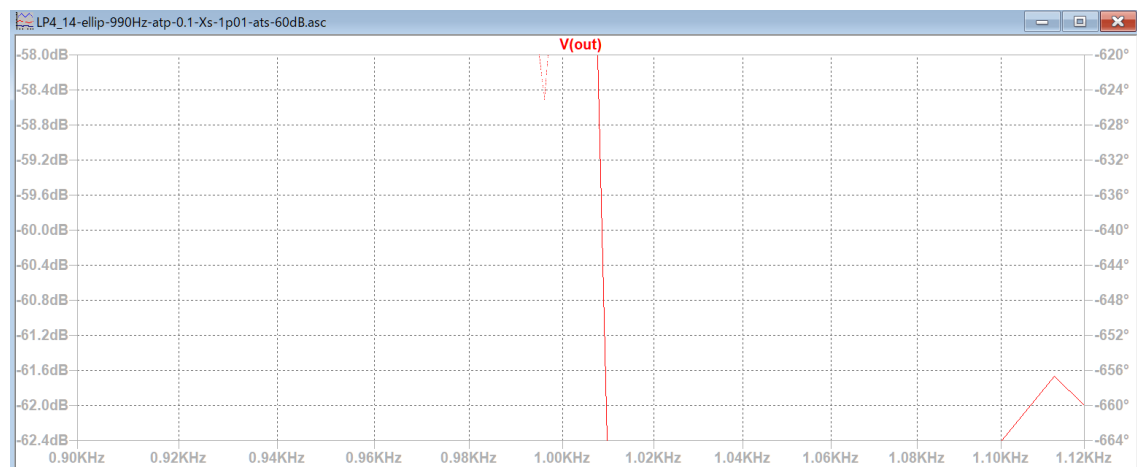


Function Low-Pass Filter



1.01KHz で減衰量が 60dB に達することが確認できる。

At 1.01 kHz, attenuation reaches 60 dB.



Xs=1.01 で、Fs=1KHz の減衰量を 60dB 以上とする設計 Design to achieve attenuation of 60 dB or more at Fs = 1 kHz with Xs = 1.01

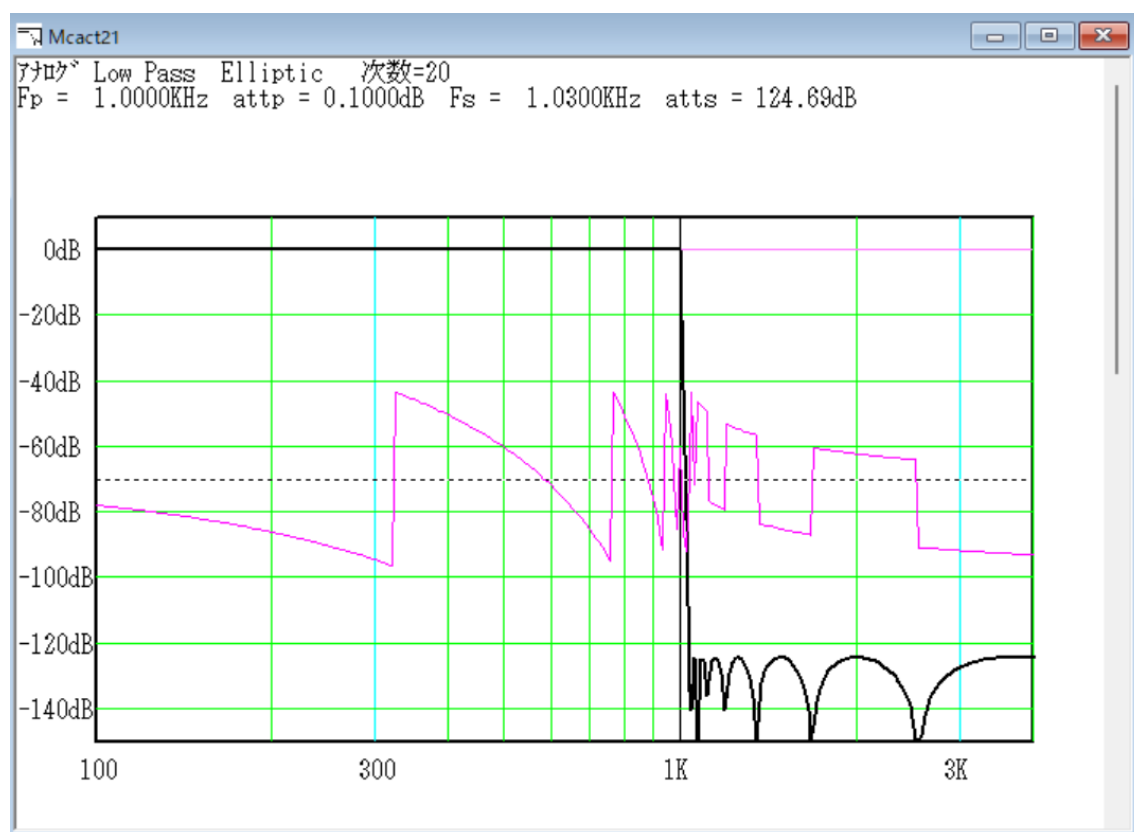
$F_p = 1 \text{ kHz}$ で $X_s = 1.03$ のとき、 F_s で 120 dB 以上の減衰を実現する設計
 Design achieving attenuation of 120 dB or more at F_s , when $F_p = 1 \text{ kHz}$ and $X_s = 1.03$

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	1	KHz	
周波数 F_p における減衰量又はリップル att_p	0.1	dB	
減衰量を指定する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_p$	1.03	倍	OK
周波数 F_s における減衰量 $atts$	120	dB	キャンセル

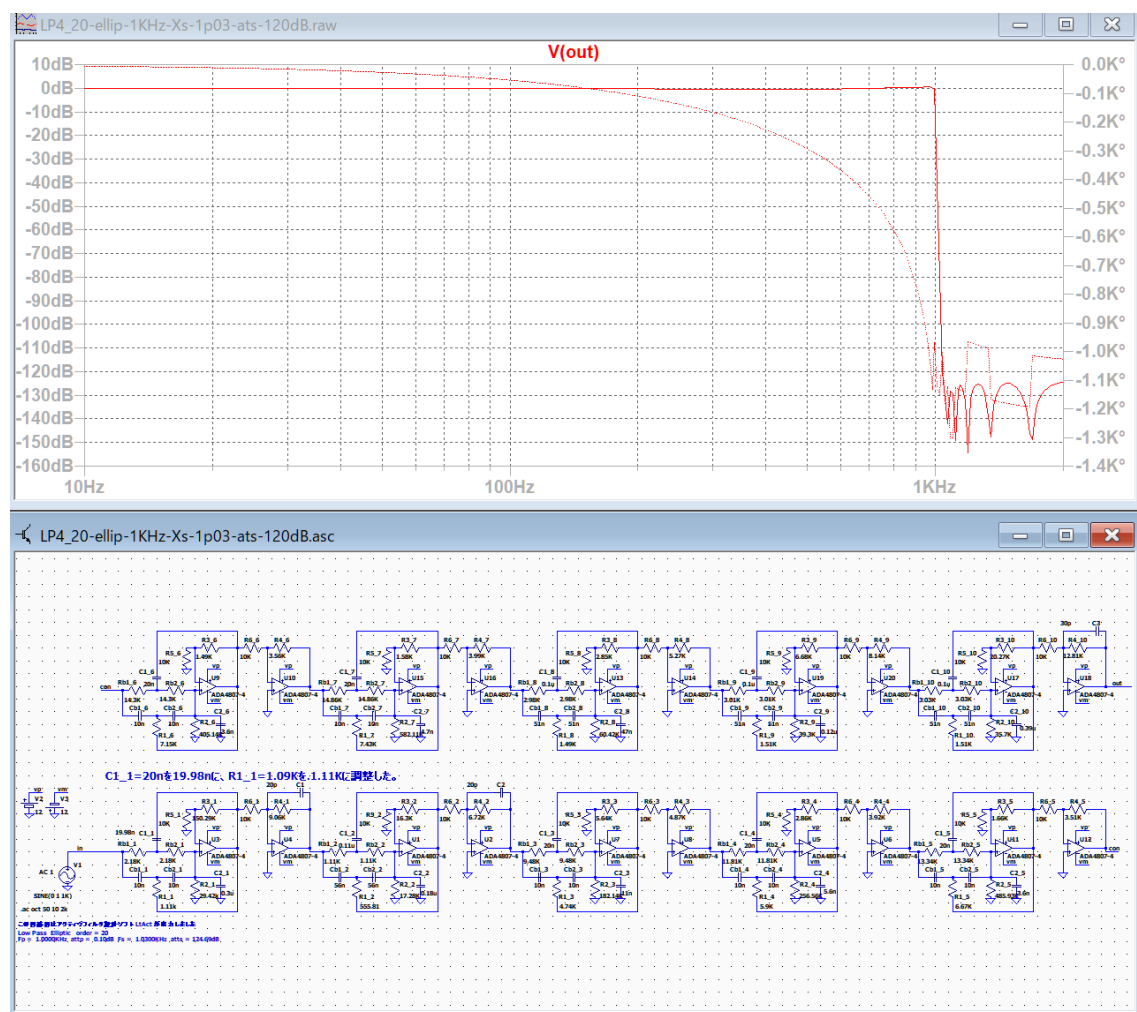
フィルタの次数は 20 次となり、 F_p は 1KHz で、 $F_s=1.03\text{KHz}$ の減衰量が 124.69dB に達する。

The filter order is 20th, F_p is 1KHz, and the attenuation at $F_s=1.03\text{KHz}$ reaches 124.69dB.



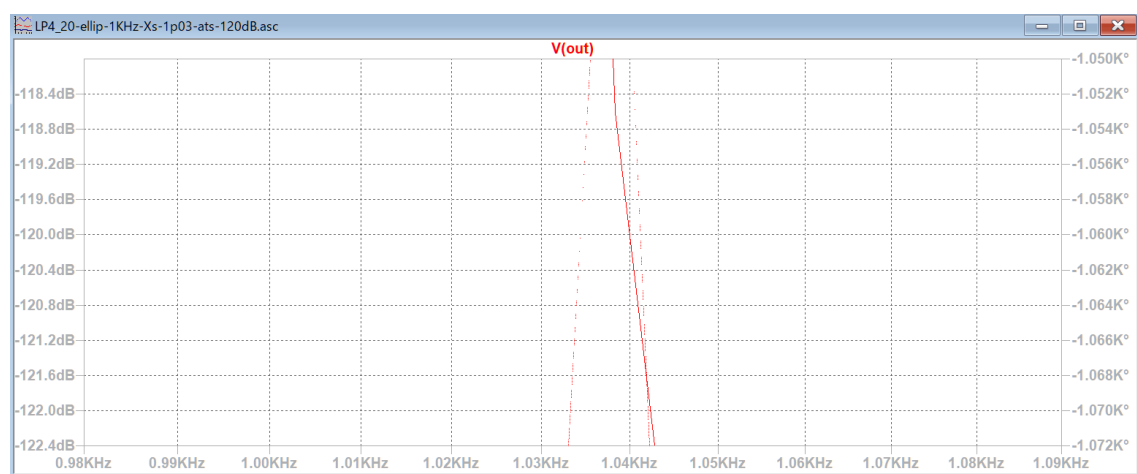
$F_p = 1 \text{ kHz}$ で $X_s = 1.03$ のとき、 F_s で 120 dB 以上の減衰を実現する設計 Design achieving attenuation of 120 dB or more at F_s , when $F_p = 1 \text{ kHz}$ and $X_s = 1.03$

Function Low-Pass Filter



1.04KHz で減衰量が 120dB に達することが確認できる。

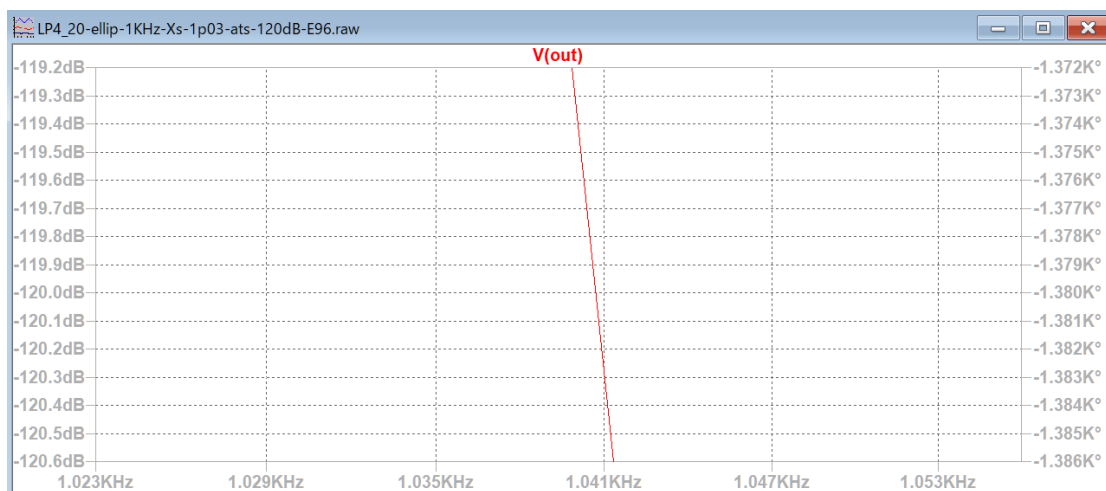
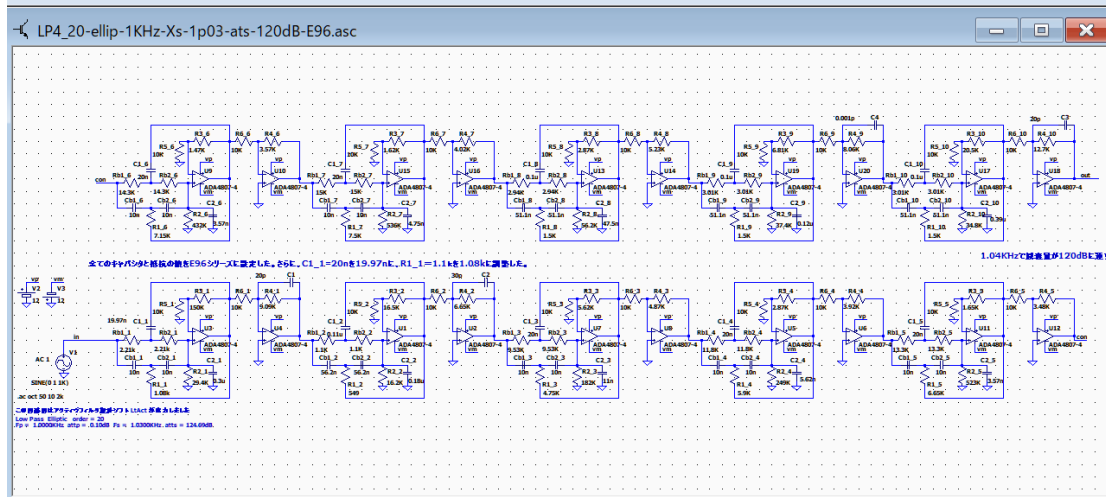
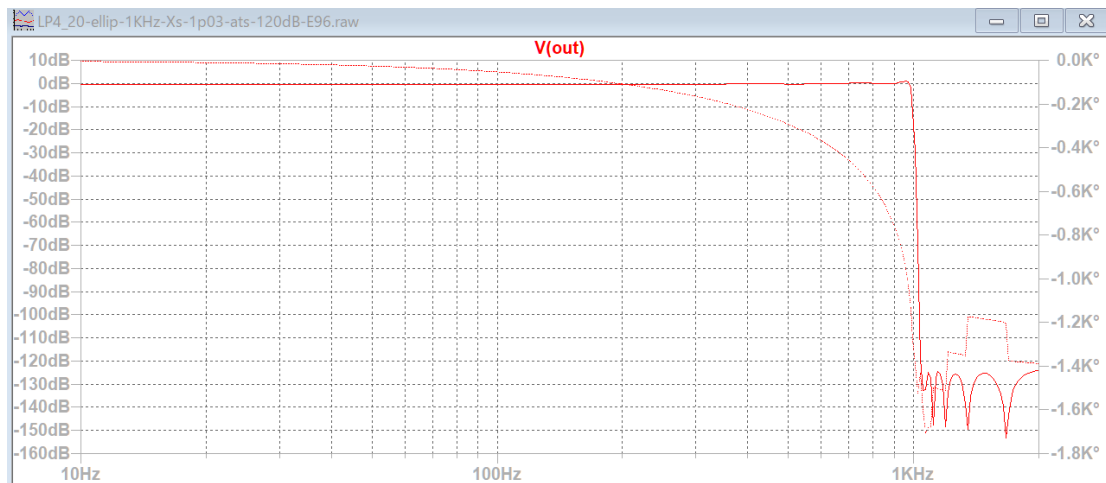
It can be seen that the attenuation reaches 120dB at 1.04KHz.



Fp = 1 kHz で Xs = 1.03 のとき、Fs で 120 dB 以上の減衰を実現する設計 Design achieving attenuation of 120 dB or more at Fs, when Fp = 1 kHz and Xs = 1.03

Function Low-Pass Filter

R と C の素子値を全て E96 シリーズに近似する All R and C element values are approximated to the E96 series



R と C の素子値を全て E96 シリーズに近似する All R and C element values are approximated to the E96 series

全ての R と C の素子値を E96 シリーズに近似してから、R1_1 と C1_1 だけを微調整した。

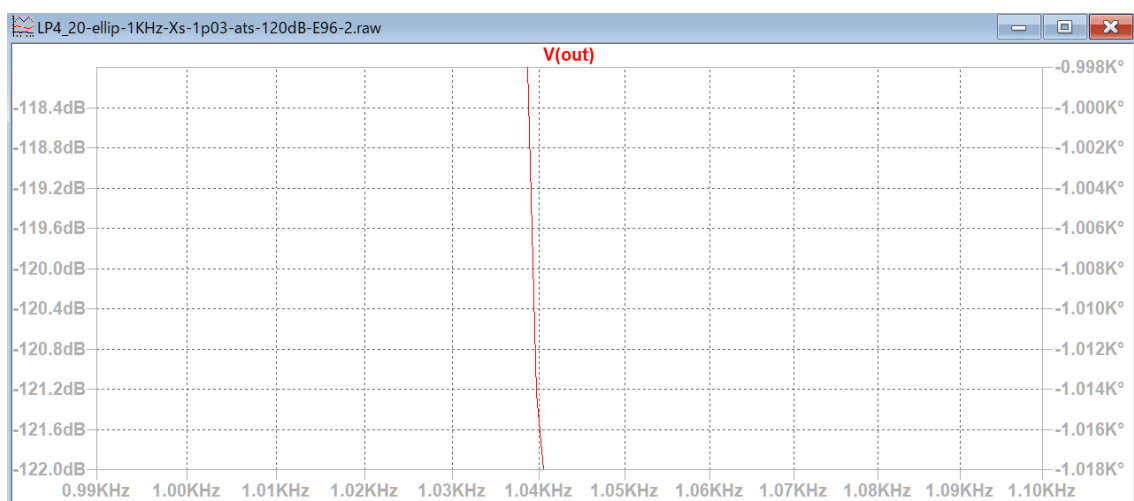
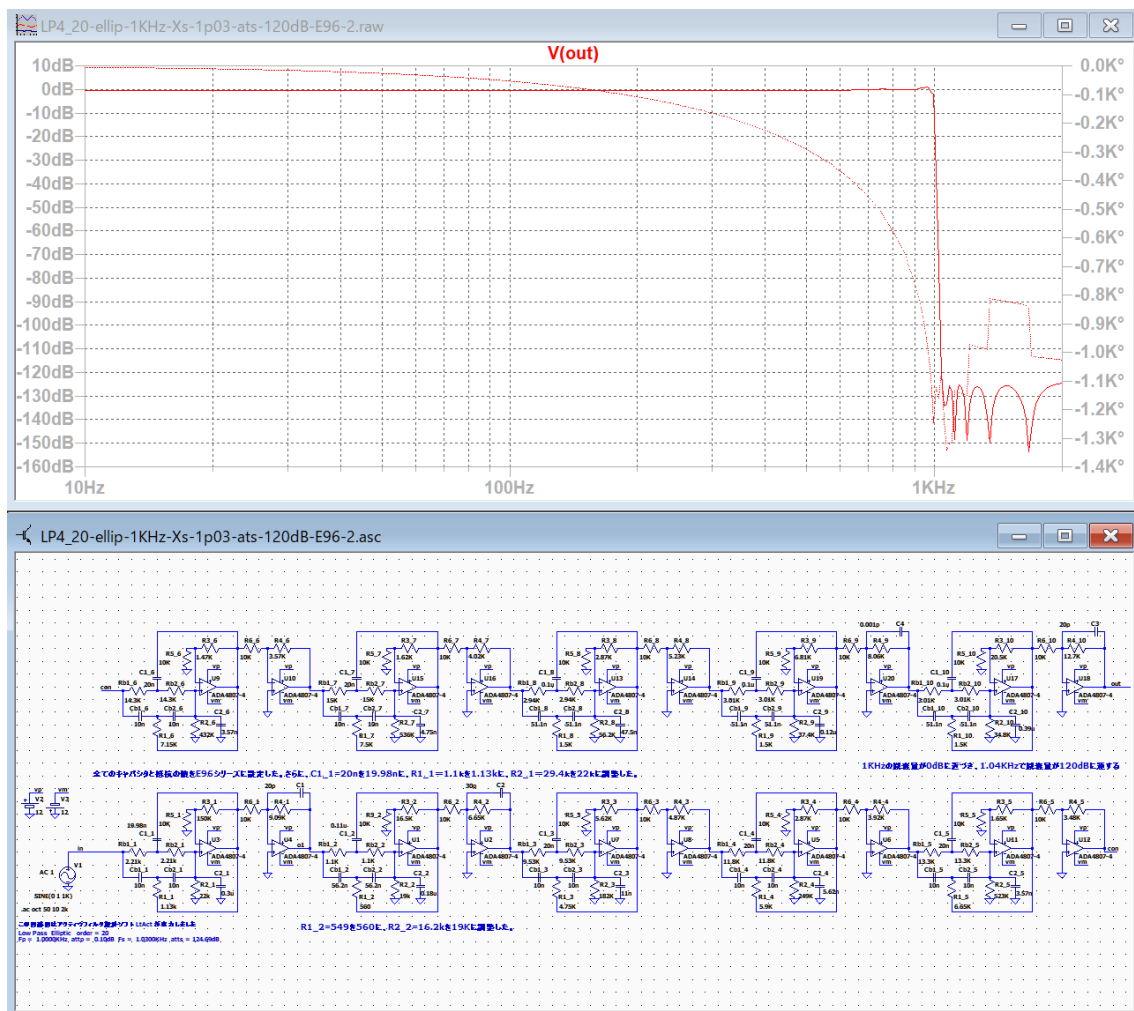
After approximating all R and C element values to the E96 series, I fine-tuned only R1_1 and C1_1.

カットオフ周波数付近の周波数特性は E96 シリーズに近似しなかった場合より少し劣化したが、減衰量は 1.04KHz で 120dB に達していることが確認できる。

The frequency characteristics near the cutoff frequency were slightly worse than when the E96 series was not approximated, but it can be confirmed that the attenuation reached 120dB at 1.04KHz.

Function Low-Pass Filter

1 段目と 2 段目を更に調整して、1KHz の減衰量を改善する Further adjust the first and second stages to improve the attenuation at 1KHz



1 段目と 2 段目を更に調整して、1KHz の減衰量を改善する Further adjust the first and second stages to improve the attenuation at 1KHz

Function Low-Pass Filter

全てのキャパシタと抵抗の値を E96 シリーズに設定した。

1 段目の $C1_1=20\text{n}$ を 19.98n に、 $R1_1=1.1\text{k}$ を 1.13k に、 $R2_1=29.4\text{k}$ を 22k に調整した。

2 段目の $R1_2=549$ を 560 に、 $R2_2=16.2\text{k}$ を 19K に調整した。

All capacitor and resistor values were set to the E96 series.

In the first stage, $C1_1=20\text{n}$ was adjusted to 19.98n , $R1_1=1.1\text{k}$ to 1.13k , and $R2_1=29.4\text{k}$ to 22k .

In the second stage, $R1_2=549$ was adjusted to 560 , and $R2_2=16.2\text{k}$ to 19K .

調整の結果、 1KHz の減衰量を 0dB に近づけることが出来た。

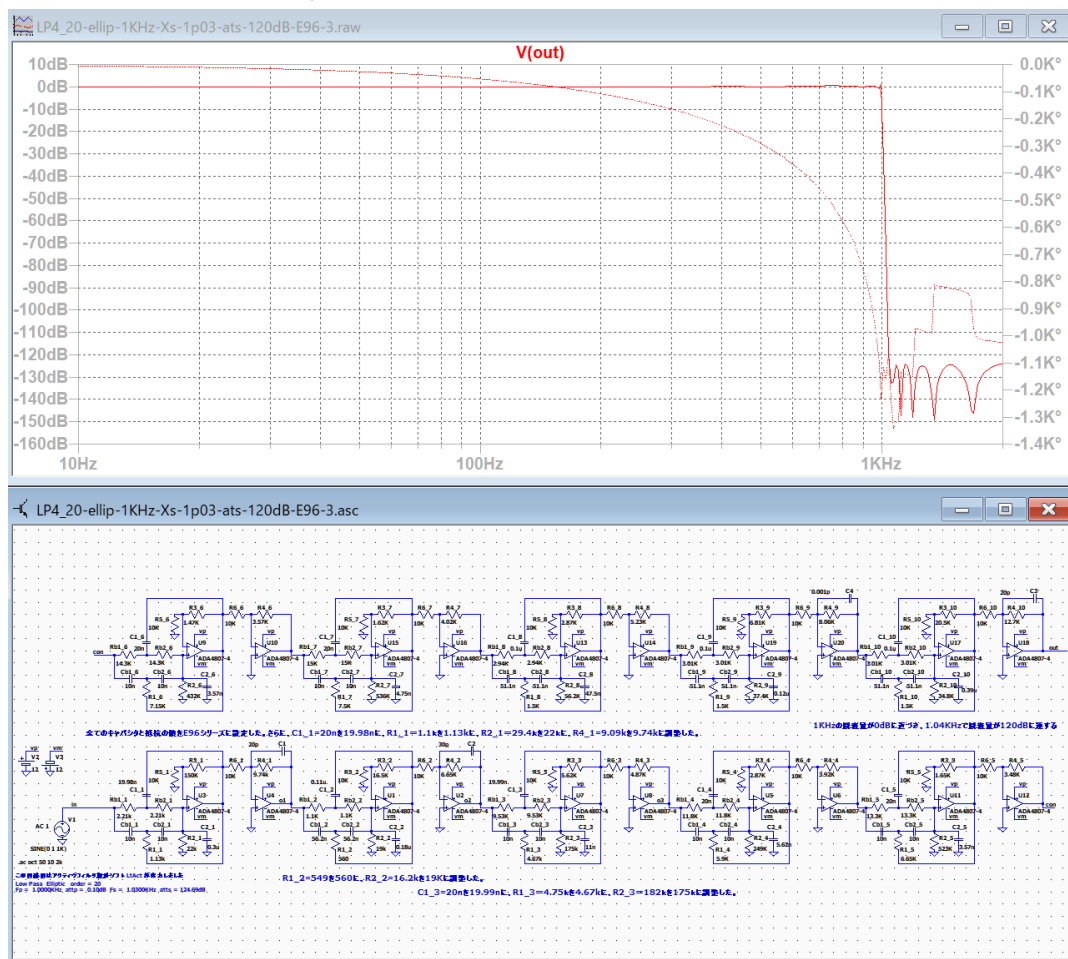
1.04KHz で減衰量が 120dB に達する。

As a result of the adjustments, the attenuation at 1KHz was able to approach 0dB .

At 1.04KHz , the attenuation reaches 120dB .

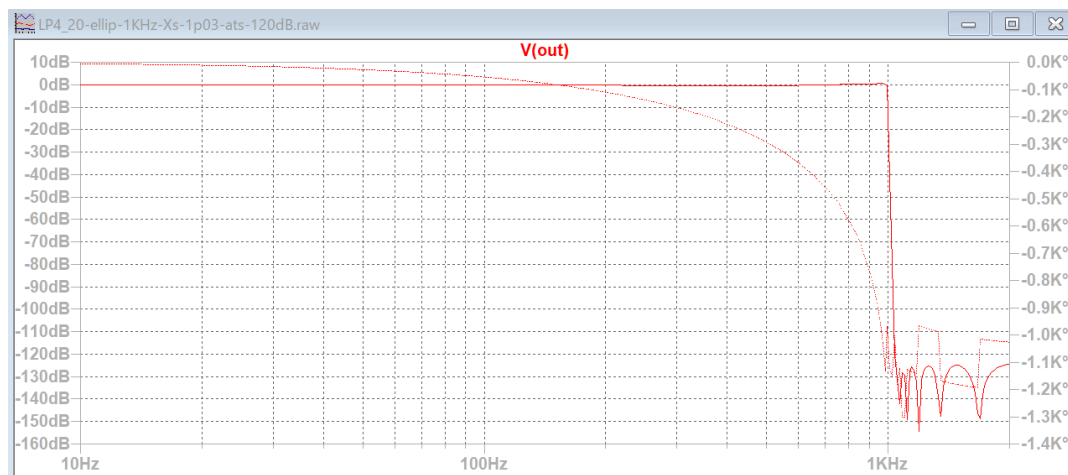
Function Low-Pass Filter

1 段目から 3 段目を更に調整して、1KHz の減衰量を改善する Further adjust the first to third stages to improve the attenuation of 1KHz



下図は E96 シリーズに近似しなかった場合の周波数特性だが、今回はこれに迫ることができた。

The graph below shows the frequency characteristics when not approximating the E96 series, but this time we were able to get close.



1 段目から 3 段目を更に調整して、1KHz の減衰量を改善する Further adjust the first to third stages to improve the attenuation of 1KHz

Function Low-Pass Filter

今回の実験の操作の流れ。

The operation flow of this experiment.

全てのキャパシタと抵抗の値を E96 シリーズに設定した。

1 段目は、C1_1=20n を 19.98n に、R1_1=1.1 k を 1.13k に、R2_1=29.4 k を 22 k に、R4_1=9.09k を 9.74k に調整した。

2 段目は、R1_2=549 を 560 に、R2_2=16.2k を 19K に調整した。

3 段目は、C1_3=20n を 19.99n に、R1_3=4.75 k を 4.67k に、R2_3=182 k を 175 k に調整した。

All capacitor and resistor values were set to the E96 series.

For the first stage, C1_1=20n was adjusted to 19.98n, R1_1=1.1k to 1.13k, R2_1=29.4k to 22k, and R4_1=9.09k to 9.74k.

For the second stage, R1_2=549 to 560, and R2_2=16.2k to 19K.

For the third stage, C1_3=20n to 19.99n, R1_3=4.75k to 4.67k, and R2_3=182k to 175k.

急峻な減衰特性の回路の場合には、全ての素子値を E シリーズに近似しなければ 1 段目の基本回路ブロックの少数個の素子値を調整するだけで、設計仕様が得られる場合が多い。

In the case of a circuit with steep attenuation characteristics, if all element values are not approximated to the E series, the design specifications can often be obtained by simply adjusting the element values of a small number of the first-stage basic circuit blocks.

しかし、全ての素子値を E96 シリーズに近似近似した場合は、複数段の基本回路ブロックの素子値を調整しなければ設計仕様に近付けることは出来ない。

However, if all element values are approximated to the E96 series, it is not possible to approach the design specifications without adjusting the element values of multiple basic circuit blocks.

Function Low-Pass Filter

E シリーズに近似する場合は、E24 や E48 シリーズに近似すると、多数のブロックの素子値を調整しても設計仕様に近付けることが出来ない場合もある。

When approximating the E series, if you approximate the E24 or E48 series, it may not be possible to approach the design specifications even if you adjust the element values of many blocks.

この実験では、E96 シリーズに近似して、1 段目から 3 段目までの基本回路ブロックの素子値を調整して設計仕様に近付けることが出来た。

In this experiment, we were able to approximate the E96 series and adjust the element values of the basic circuit blocks from the first to third stages to come close to the design specifications.

もしも E192 シリーズに近似すると、1 段目のみまたは 1 段目から 2 段目までの基本回路ブロックの素子値を調整すれば設計仕様に近付けることが出来ると思われる。

If we approximate the E192 series, it seems possible to approach the design specifications by adjusting the element values of the basic circuit blocks in only the first stage or from the first to second stages.

参考：「LtAct 操作説明書.pdf」の「素子値を E シリーズに近似する」では、回路図の素子値を E シリーズに近似した場合の周波数特性の劣化について紹介している。

フィルタの次数が 10 次を越える場合には、E24 シリーズに近似すると設計仕様に近付けることが出来ない。

Reference: "素子値を E シリーズに近似する Approximating Element Values to the E Series" in the " LtAct 操作説明書.pdf LtAct Operation Manual.pdf" explains the degradation of frequency characteristics when approximating the element values of a circuit diagram to the E series.

If the filter order is over 10, approximating it to the E24 series will not bring it close to the design specifications.

フィルターの次数と周波数ごとの減衰量 Filter order and attenuation for each frequency

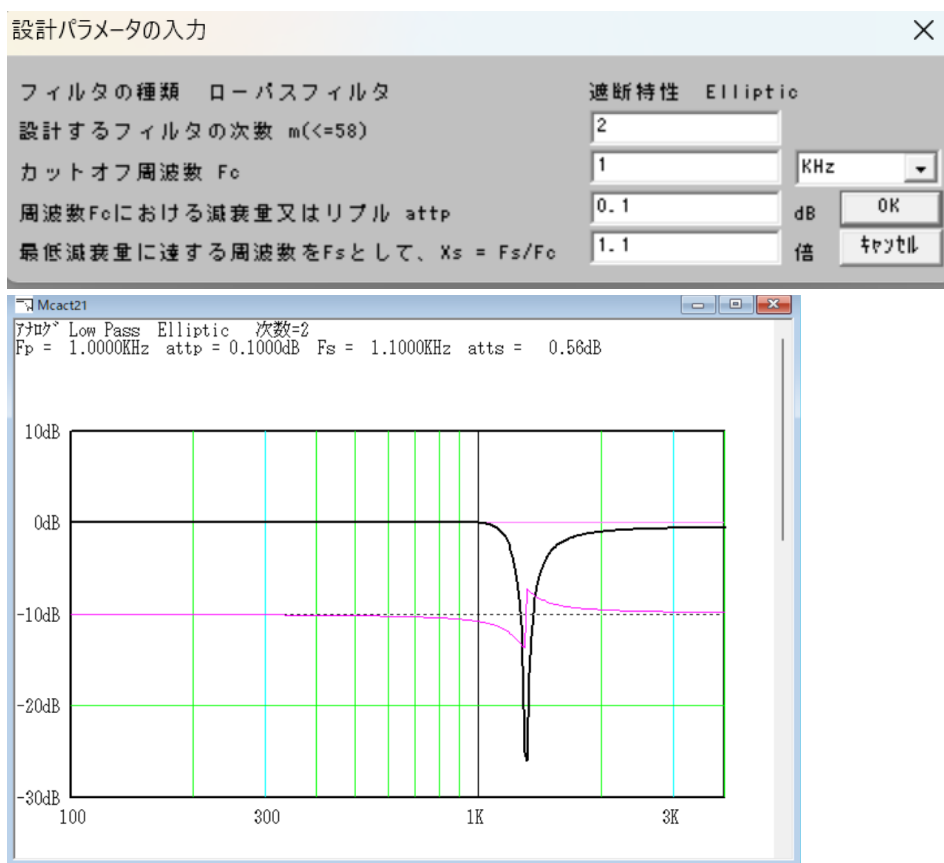
「次数を入力する」で、楕円関数・ローパスフィルタの次数が2次、6次、10次の場合を設計して、周波数ごとに減衰量がどのように変化するかを確認して表を作成しました。

In "Enter the Order," we designed elliptic function low-pass filters with orders of 2nd, 6th, and 10th, and created a table to check how the attenuation changes for each frequency.

減衰量の測定方法 How to measure attenuation

「次数を入力する時」の入力方法で、次数を2、カットオフ周波数を1KHz、attp=0.1dB、Xs=1.1と入力して「OK」を押します。

Using the "When entering the order" input method, enter the order as 2, the cutoff frequency as 1KHz, attp=0.1dB, and Xs=1.1, then press "OK."



グラフの上部に表示された情報から、 $F_c=1\text{KHz}$ の減衰量は 0.1dB、 $F_s=1.1\text{KHz}$ の減衰量は 0.56dB と確認できます。 $F=0\text{Hz}$ の減衰量はグラフから、0dB とします。

From the information displayed at the top of the graph, we can see that the attenuation for $F_c=1\text{KHz}$ is 0.1dB, and the attenuation for $F_s=1.1\text{KHz}$ is 0.56dB. From the graph, we can see that the attenuation for $F=0\text{Hz}$ is 0dB.

Function Low-Pass Filter

周波数 F の減衰量は $F=0$ 、 F_c 、 $1.1 F_c$ に対して 0, 0.1, 0.56dB と求められます。

The attenuation of frequency F is calculated as 0, 0.1, 0.56dB for $F=0$, F_c , $1.1 F_c$.

次に、 $X_s=1.5, 2, 10$ に対する設計を行います。

Next, we will design for $X_s=1.5, 2, 10$.

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 $m(<=58)$	2		
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、 $X_s = F_s/F_c$	1.5	倍	キャンセル

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 $m(<=58)$	2		
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、 $X_s = F_s/F_c$	2	倍	キャンセル

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 $m(<=58)$	2		
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、 $X_s = F_s/F_c$	10	倍	キャンセル

このようにして、 $F=1.5 F_c$ 、 $2 F_c$ 、 $10 F_c$ に対して 3.21, 7.42, 35.67dB と求められます。

In this way, we get 3.21, 7.42, and 35.67dB for $F=1.5 F_c$, $2 F_c$, and $10 F_c$.

Function Low-Pass Filter

次に、次数を 2、カットオフ周波数を 1KHz、attp=1dB と入力して、Xs=1.1, 1.5, 2 および 10 の設計を行います。

Next, enter the order as 2, the cutoff frequency as 1KHz, and attp=1dB, and design Xs=1.1, 1.5, 2, and 10.

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 $m(<=58)$	2		
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	1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$	1.1	倍	キャンセル

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 $m(<=58)$	2		
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	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

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 $m(<=58)$	2		
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	1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$	2	倍	キャンセル

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 $m(<=58)$	2		
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	1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$	10	倍	キャンセル

Function Low-Pass Filter

それから、次数が 6 と 10 についても同様の設計を行って減衰量をまとめると下表が得られます。

Then, by performing a similar design for orders 6 and 10 and summarizing the attenuation amounts, we obtain the table below.

楕円関数・ローパスフィルタの減衰量(dB) リプルが 0.1dB の場合

周波数/次数	0	F_c	$1.1 F_c$	$1.5 F_c$	$2 F_c$	dB/oct/order	$10 F_c$	dB/dec/order
2	0	0.1	0.56	3.21	7.42	3.71	35.67	17.84
6	0	0.1	29.69	57.77	75.35	12.56	163.75	27.29
10	0	0.1	68.38	115.20	146.17	14.62	291.83	29.18

楕円関数・ローパスフィルタの減衰量(dB) リプルが 1dB の場合

周波数/次数	0	F_c	$1.1 F_c$	$1.5 F_c$	$2 F_c$	dB/oct/order	$10 F_c$	dB/dec/order
2	0	1	4.03	11.19	17.10	8.55	46.13	23.07
6	0	1	40.14	68.23	86.81	14.47	174.21	29.04
10	0	1	78.84	125.66	156.63	15.66	302.28	30.23

通過域のリプルが 0.1dB と 1dB の場合について、カットオフ周波数を F_c として、周波数が 0Hz, $1.1 F_c$, $1.5 F_c$, $2 F_c$ および $10 F_c$ の減衰量(dB)を測定しました。

For passband ripples of 0.1dB and 1dB, the attenuation (dB) was measured at frequencies of 0Hz, $1.1 F_c$, $1.5 F_c$, $2 F_c$, and $10 F_c$, with the cutoff frequency set to F_c .

表より、楕円関数・ローパスフィルタの減衰量は、他のパラメータが等しい場合、attp が大きくなるほど減衰量が増加する。

As can be seen from the table, the attenuation of the elliptic function low-pass filter increases as attp increases, provided that other parameters are equal.

周波数が 2 倍になるごとに減衰量が 4 ～16 dB / 次 増加します。また周波数が 10 倍になるごとに減衰量が 18 ～30 dB / 次 増加します。

Every doubling of frequency increases the attenuation by 4 to 16 dB / order, and every ten-fold increase in frequency increases the attenuation by 18 to 30 dB / order.

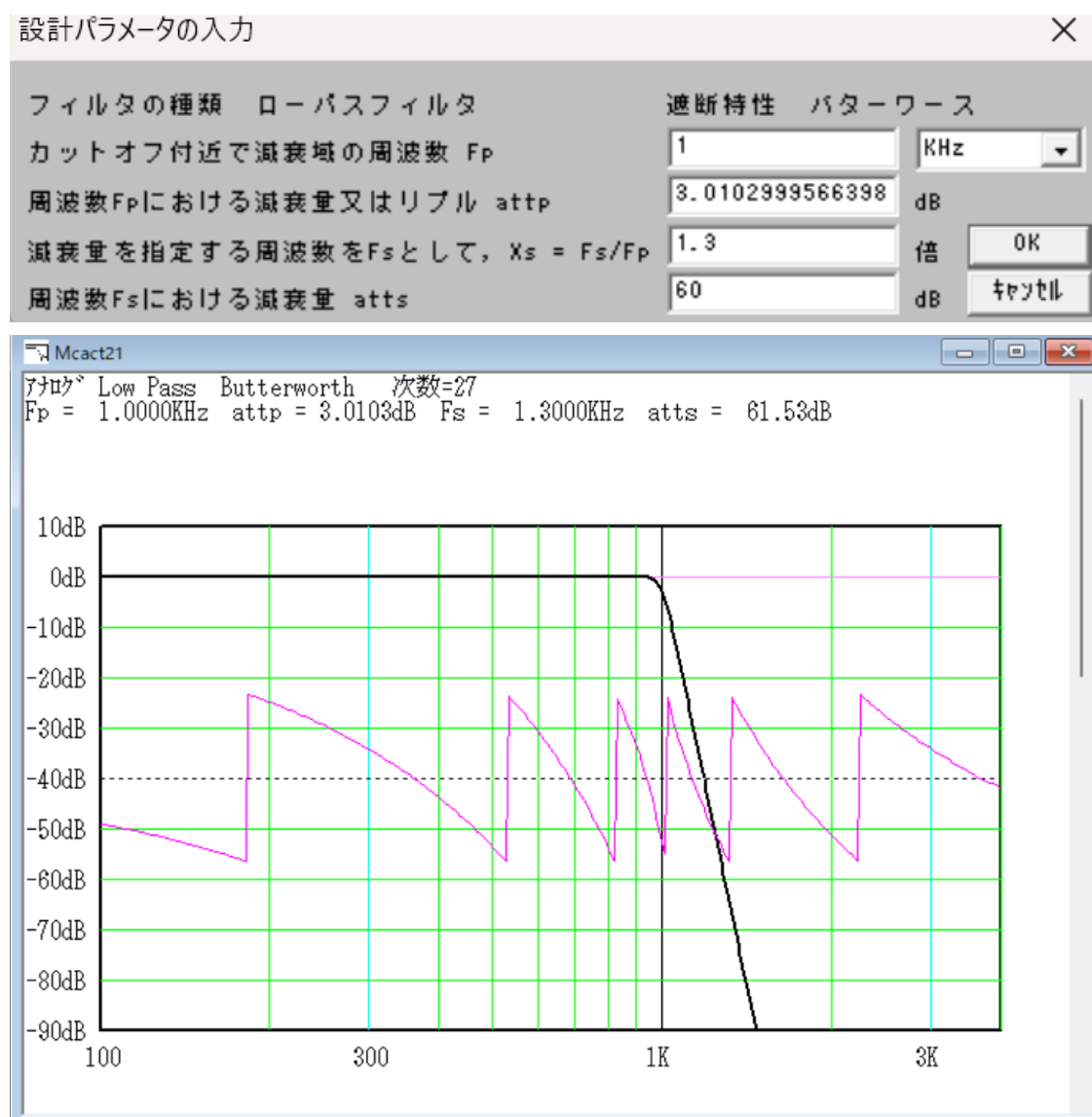
減衰特性の比較 Comparison of damping characteristics

比較例 1 Comparative example 1

カットオフ周波数を 1KHz として、1.3KHz における減衰量が 60dB 程度となるフィルタを設計する場合

When designing a filter with a cutoff frequency of 1 kHz and an attenuation of about 60 dB at 1.3 kHz

バターワースフィルタの場合 Butterworth filter case



フィルターが奇数次数になった。

The filter is now odd order.

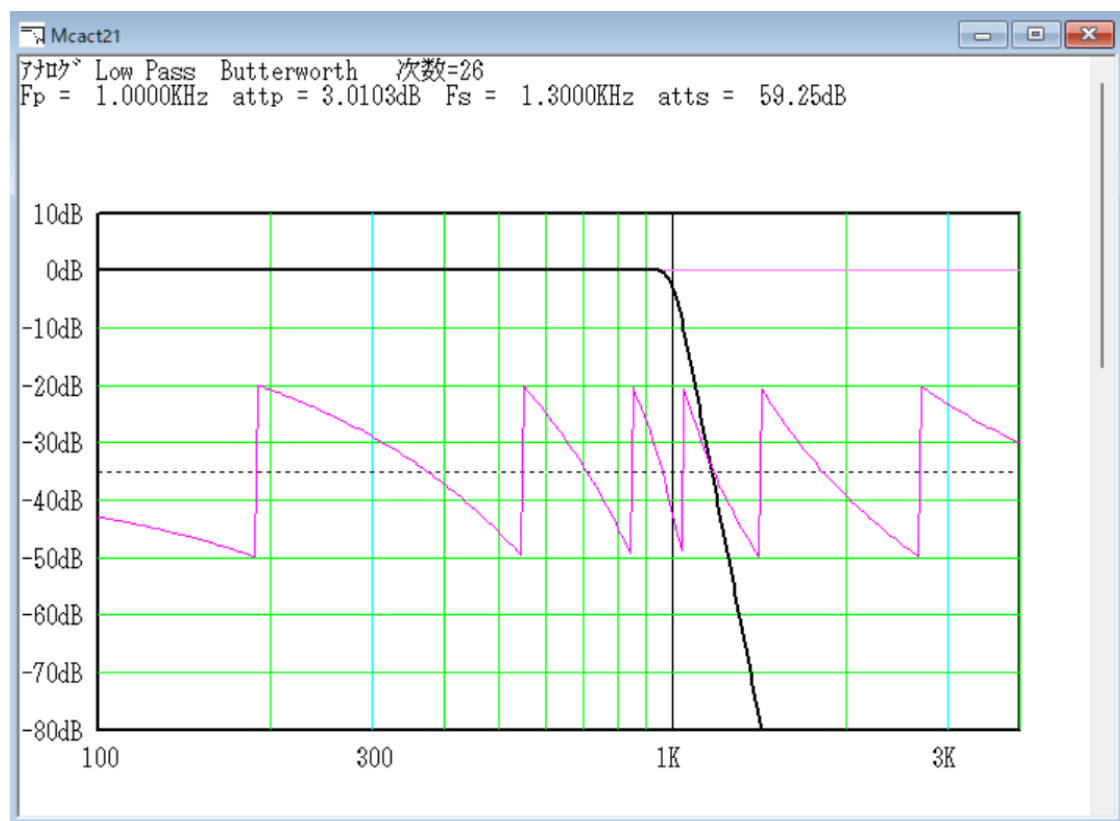
バターワースフィルタの場合 Butterworth filter case

フィルタの次数が奇数次になるので、26 次のフィルタを設計することにする。

Since the order of the filter is odd, we will design a 26th order filter.

設計パラメータの入力

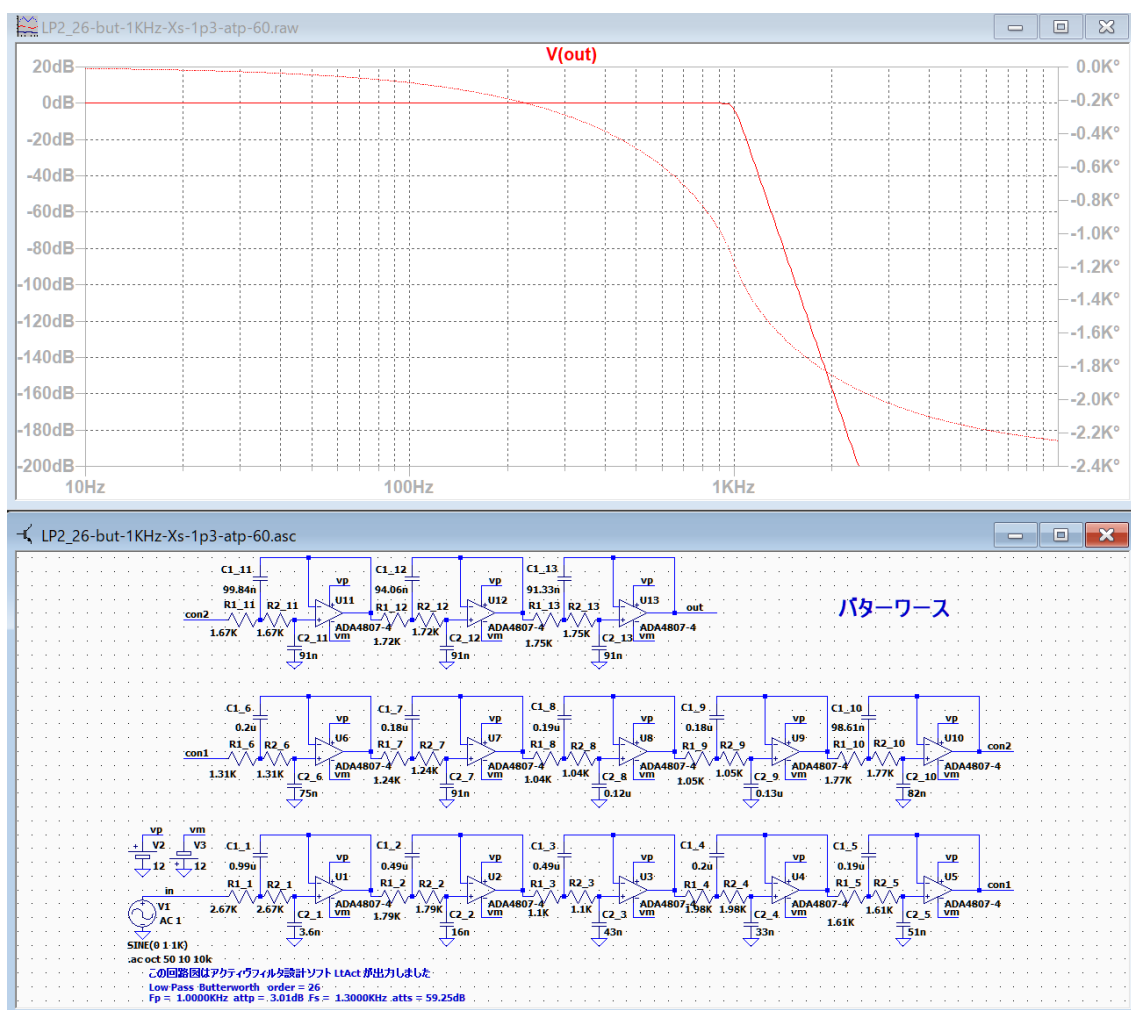
フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	バターワース
設計するフィルタの次数 $m(<=58)$	26		
カットオフ周波数 F_c	1	KHz	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$	1.3	倍	キャンセル



1.3KHz の減衰量は 59.25 dB となる。

The attenuation at 1.3KHz is 59.25 dB.

バターワースの結果 Butterworth Results



バターワース・フィルタではフィルタの次数は 26 次となり、

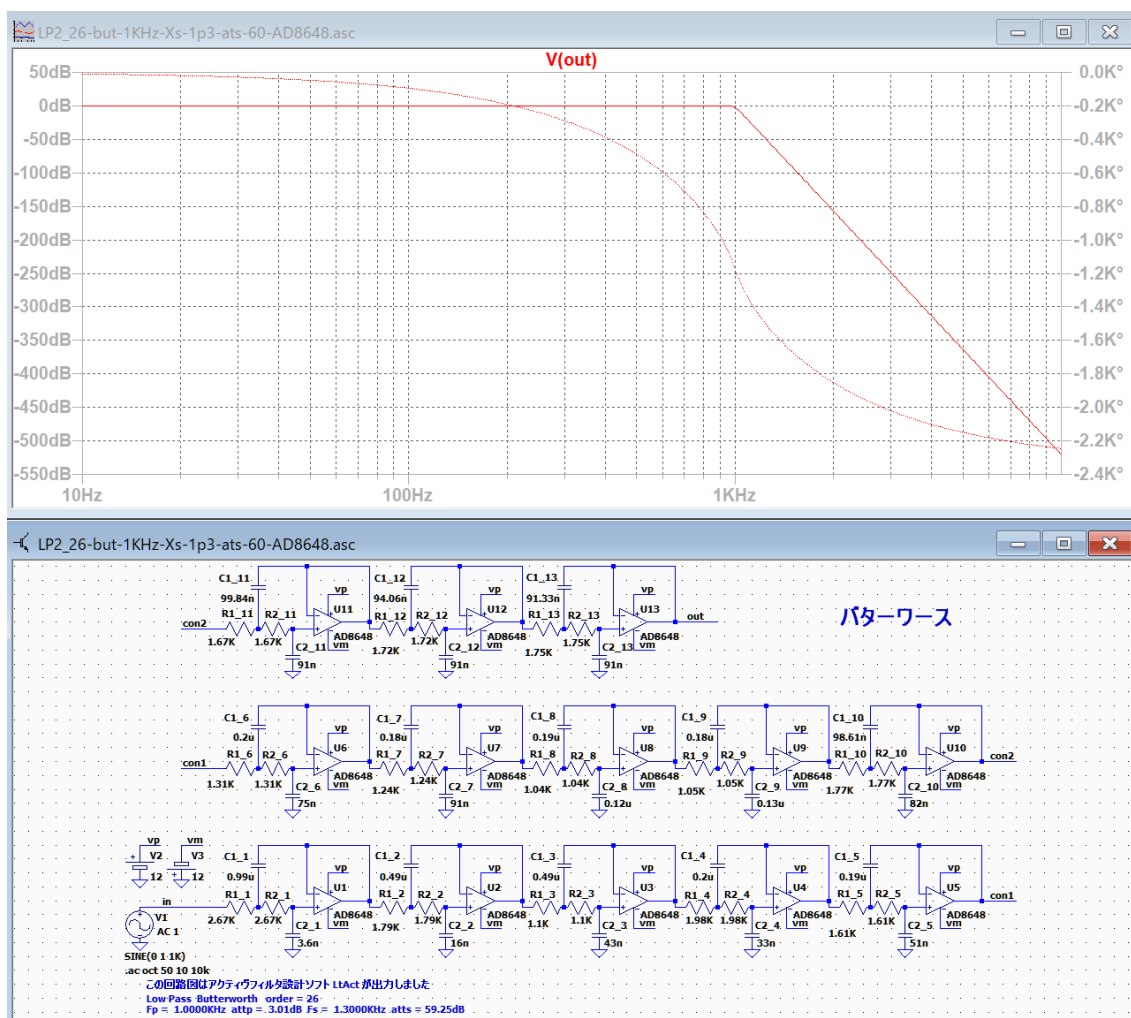
減衰量は 1KHz で 3.15dB、1.3KHz で 59.4dB となる。

1KHz の減衰量が 3.0dB にならないのは、オペアンプの入力電流と R1_1 などによって入力信号が低下する影響が考えられるので、オペアンプを JFET の AD8648 に変更して周波数特性を確認します。

The Butterworth filter has a filter order of 26, and the attenuation is 3.15dB at 1KHz and 59.4dB at 1.3KHz.

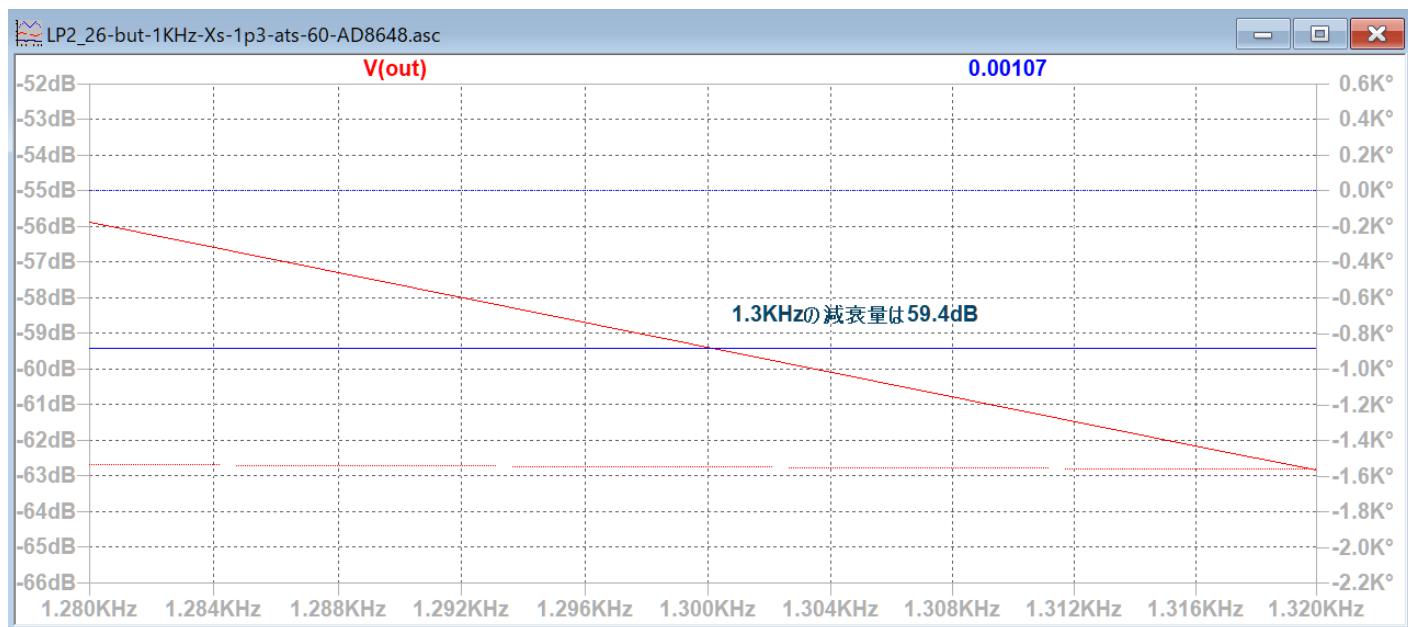
The reason why the attenuation at 1KHz is not 3.0dB is thought to be due to the influence of the input current of the op amp and the input signal being reduced by R1_1, etc., so we will change the op amp to a JFET AD8648 and check the frequency characteristics.

オペアンプを AD8648 に変更した結果 Results of changing the op-amp to AD8648



バターワース・フィルタではフィルタの次数は 26 次となり、
減衰量は 1KHz で 3.0dB、1.3KHz で 59.4dB となる。

The Butterworth filter has a filter order of 26, with attenuation of 3.0 dB at 1 kHz and 59.4 dB at 1.3 kHz.

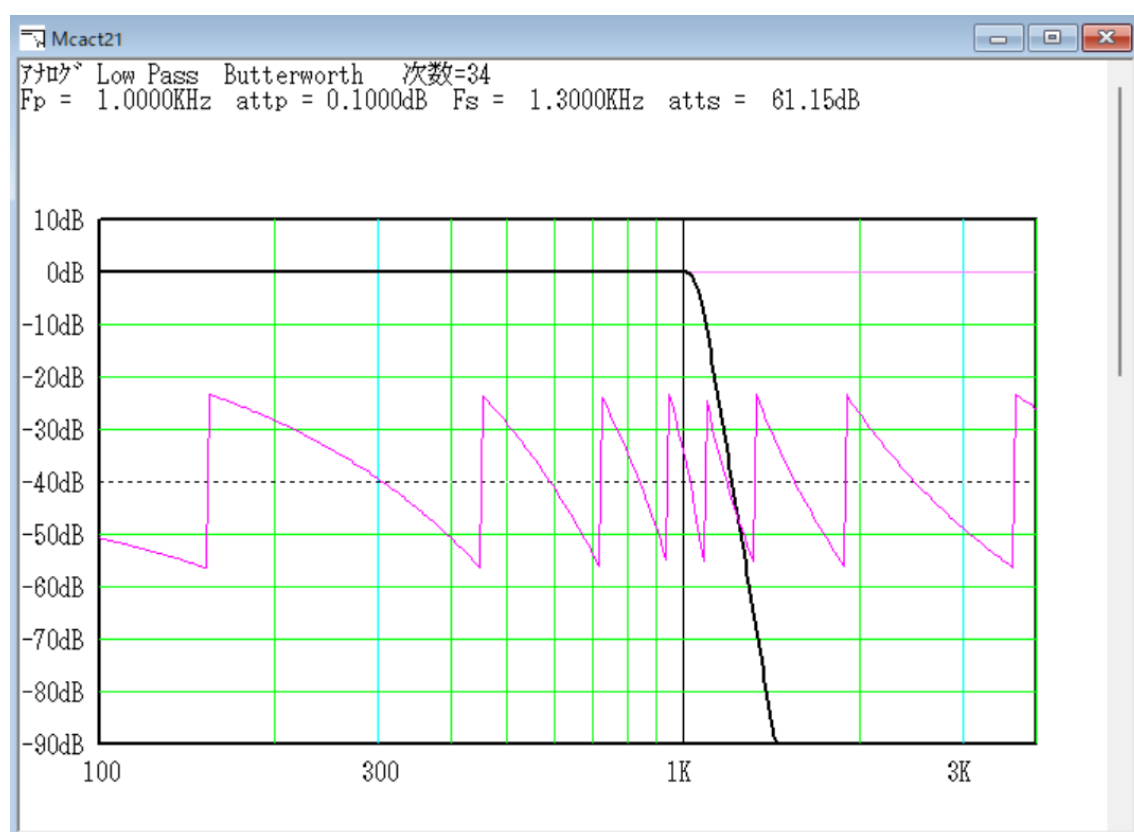


参考実験

(逆)チェビシェフや楕円関数フィルタの場合と同様に、減衰量を 1KHz で 0.1dB、1.3KHz で約 60dB として「次数を入力しない」方法で設計してみる。

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	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 att_p	0.1	dB	
減衰量を指定する周波数を F_s として, $X_s = F_s/F_p$	1.3	倍	OK
周波数 F_s における減衰量 att_s	60	dB	キャンセル

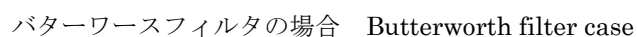


フィルタの次数は 34 次まで高くなります。

減衰量は 1KHz で 0.1dB、1.3KHz で 61.15dB になることが分かる。

オペアンプは JFET の AD8648 に変更した。

減衰量は 1KHz で-0.17dB、1.3KHz で 61.38dB になった。



チェビシェフフィルタの場合 In the case of the Chebyshev filter

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 $m(\leq 58)$

カットオフ周波数 F_c KHz

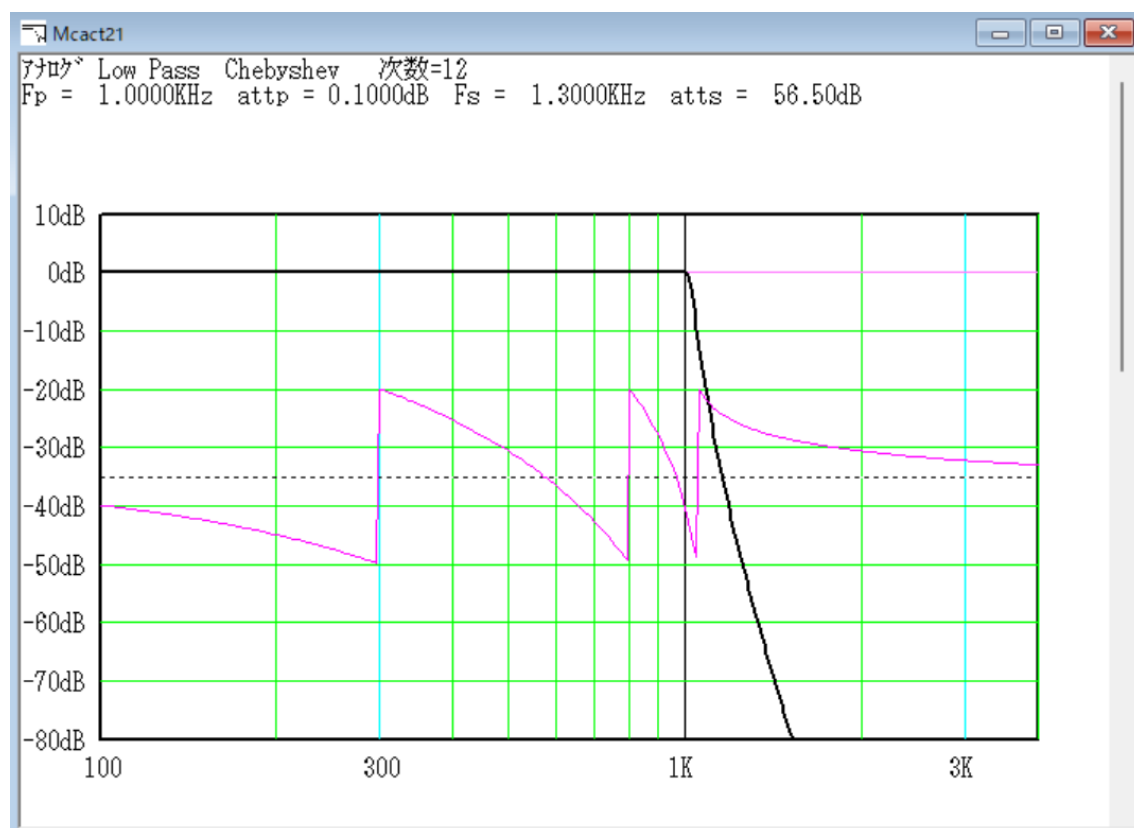
周波数 F_c における減衰量又はリップル att_p dB

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

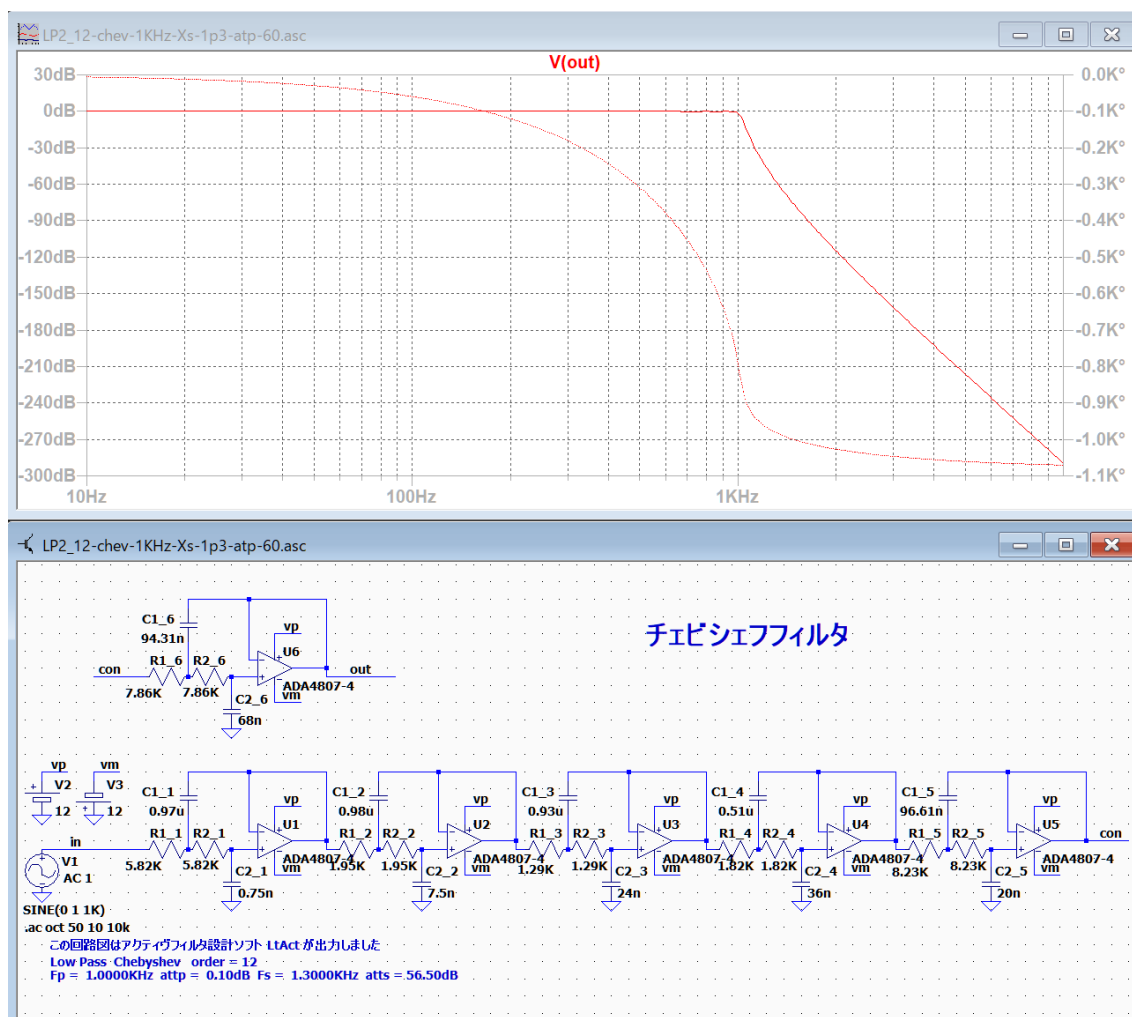
OK キャンセル

1.3KHz の減衰量が約 60dB で、フィルタの次数が偶数次となるように設計した。

The attenuation at 1.3 kHz is approximately 60 dB, and the filter was designed to have an even-numbered order.



チェビシェフの結果 Chebyshev's results

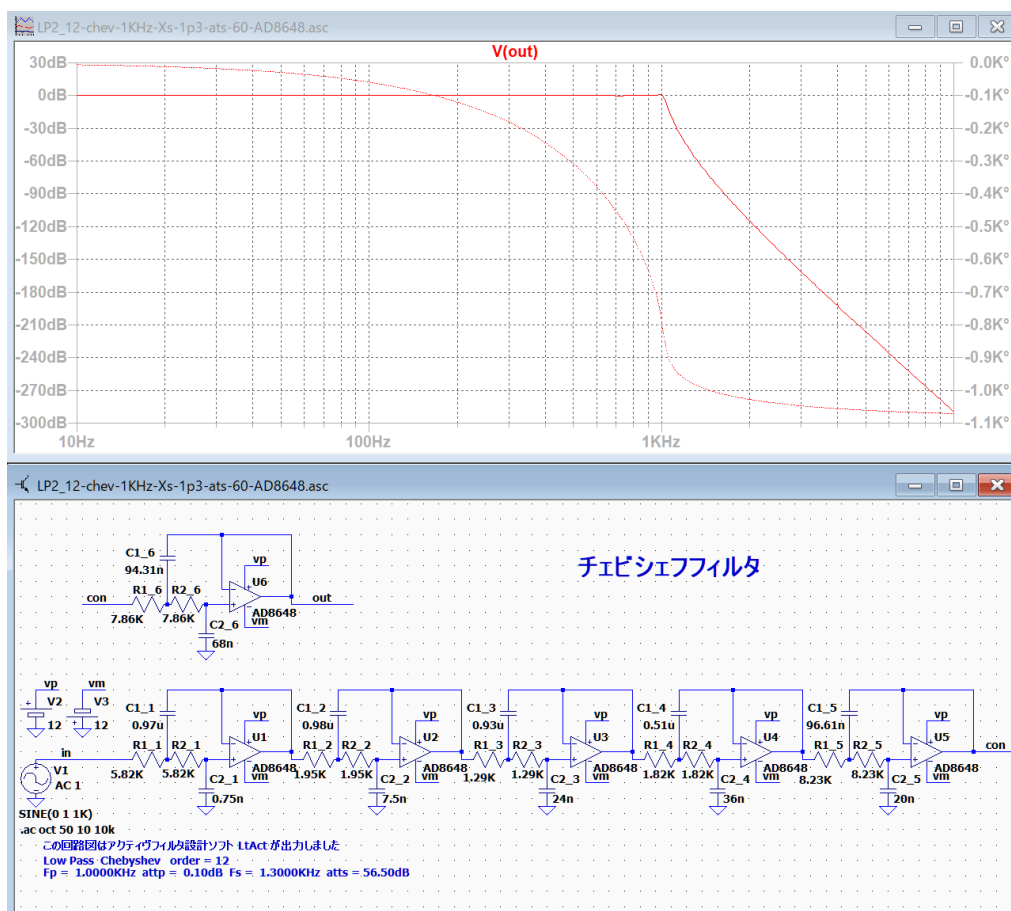


チェビシェフ・フィルタでは次数は12次となり、
減衰量は1KHzで1.3dB、1.3KHzで56.2dBとなる。
1KHzの減衰量が0.1dBからずれているので、オペアンプをJFETのAD8648に変更して周波数特性を確認する。

The Chebyshev filter has a 12th order, and the attenuation is 1.3dB at 1KHz and 56.2dB at 1.3KHz.

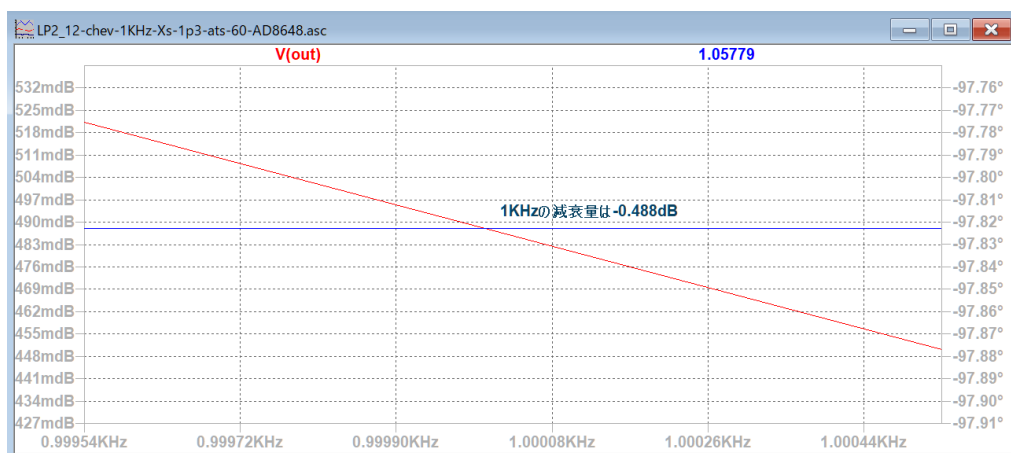
Since the attenuation at 1KHz is different from 0.1dB, change the op amp to a JFET AD8648 and check the frequency characteristics.

オペアンプを AD8648 に変更した結果 Results of changing the op-amp to AD8648



チェビシェフ・フィルタでは次数は 12 次となり、
減衰量は 1KHz で -0.488dB、1.3KHz で 56.2dB となる。

The Chebyshev filter has a 12th-order response, with attenuation of -0.488 dB at 1 kHz and 56.2 dB at 1.3 kHz.



チェビシェフフィルタの場合 In the case of the Chebyshev filter

逆チェビシェフフィルタの場合 In the case of the inverse Chebyshev filter

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

設計するフィルタの次数 $m(<=58)$

カットオフ周波数 F_c KHz

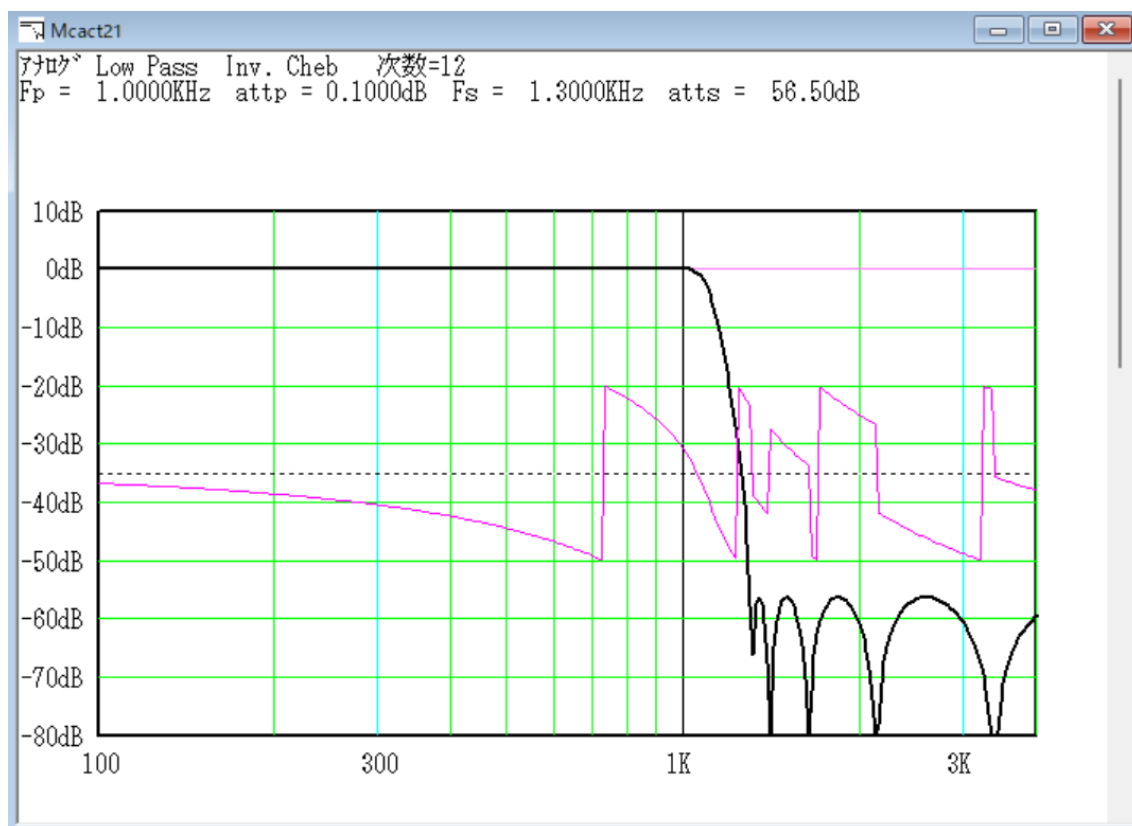
周波数 F_c における減衰量又はリップル att_p dB

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

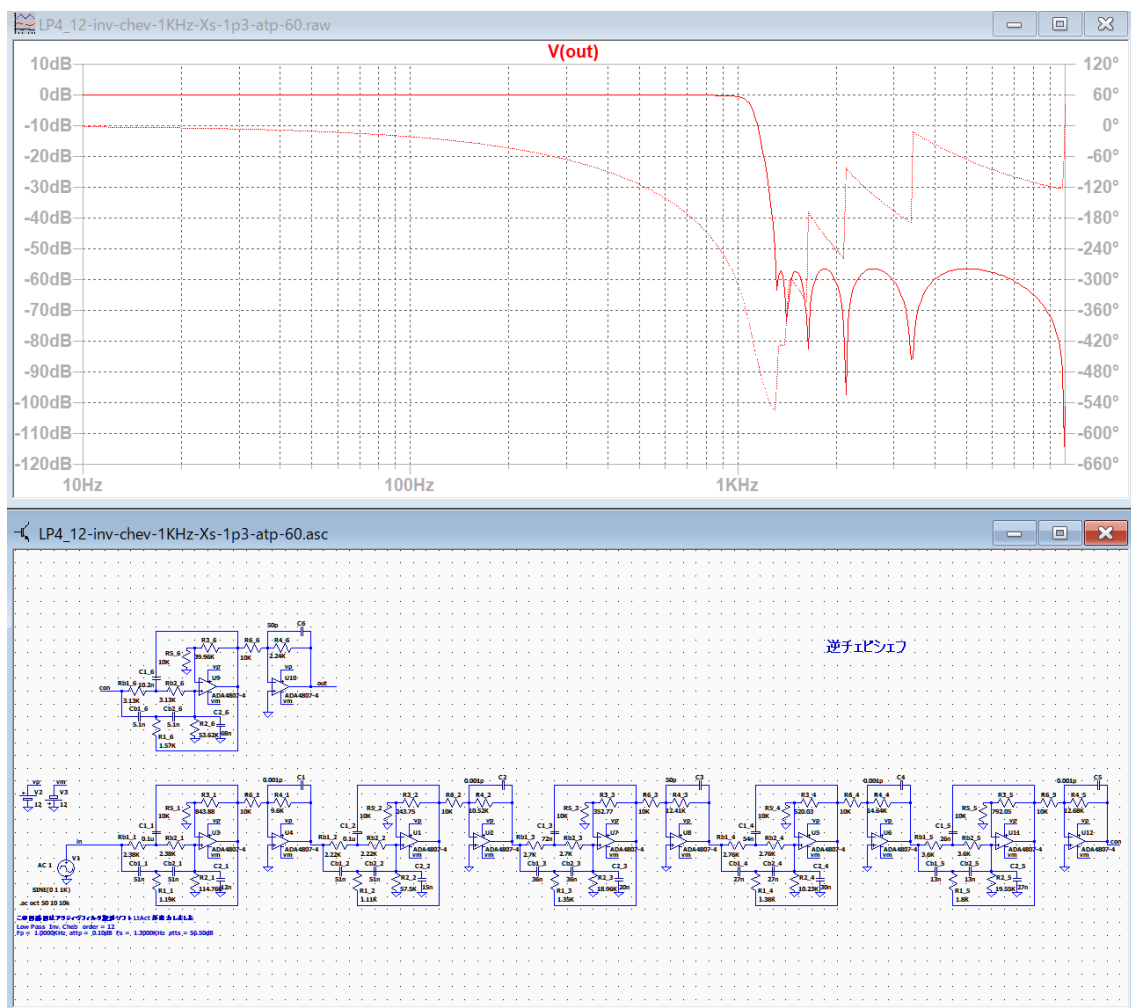
遮断特性 Inv. Cheb

1.3KHz の減衰量が約 60dB で、フィルタの次数が偶数次となるように設計した。

The attenuation at 1.3 kHz is approximately 60 dB, and the filter was designed to have an even-numbered order.



逆チェビシェフの結果 Reverse Chebyshev's Result



逆チェビシェフ・フィルタでは次数は 12 次となり、
減衰量は 1KHz で 0.5dB、1.3KHz で 56.2dB となる。

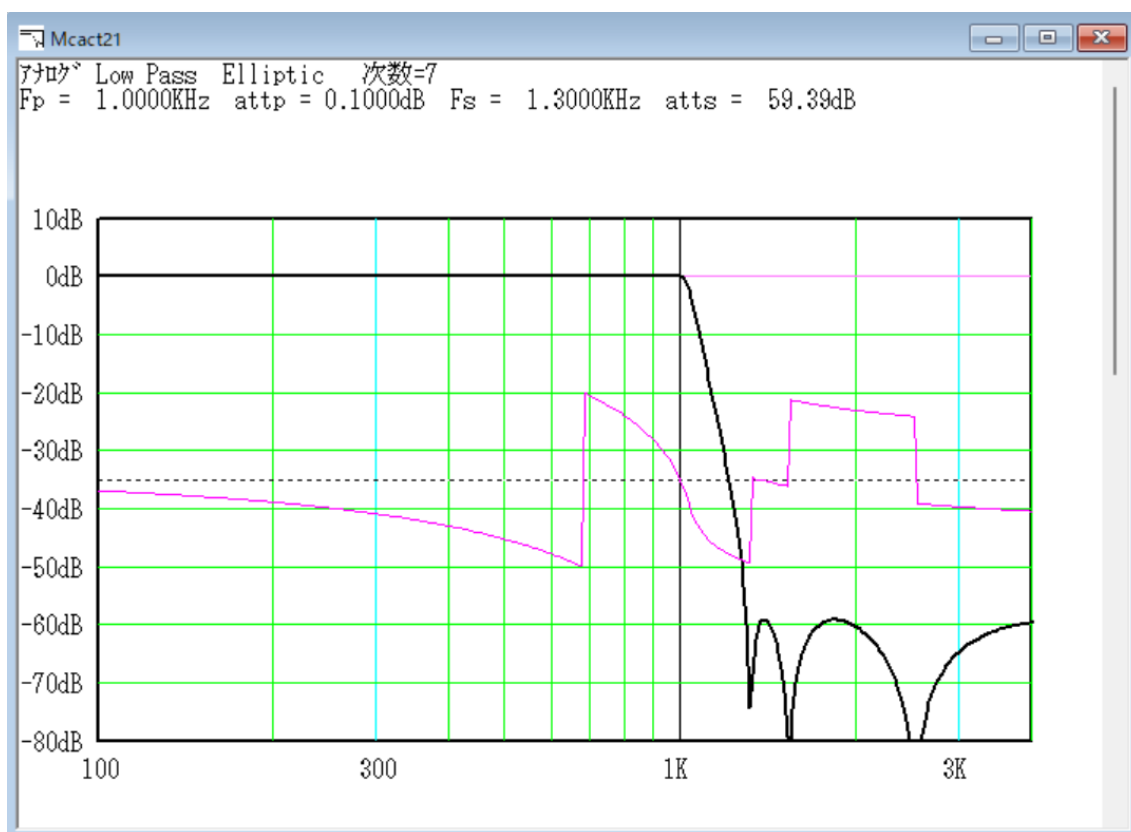
The inverse Chebyshev filter has a 12th-order response,
with attenuation of 0.5 dB at 1 kHz and 56.2 dB at 1.3 kHz.

楕円関数フィルタの場合 In the case of elliptic function filters

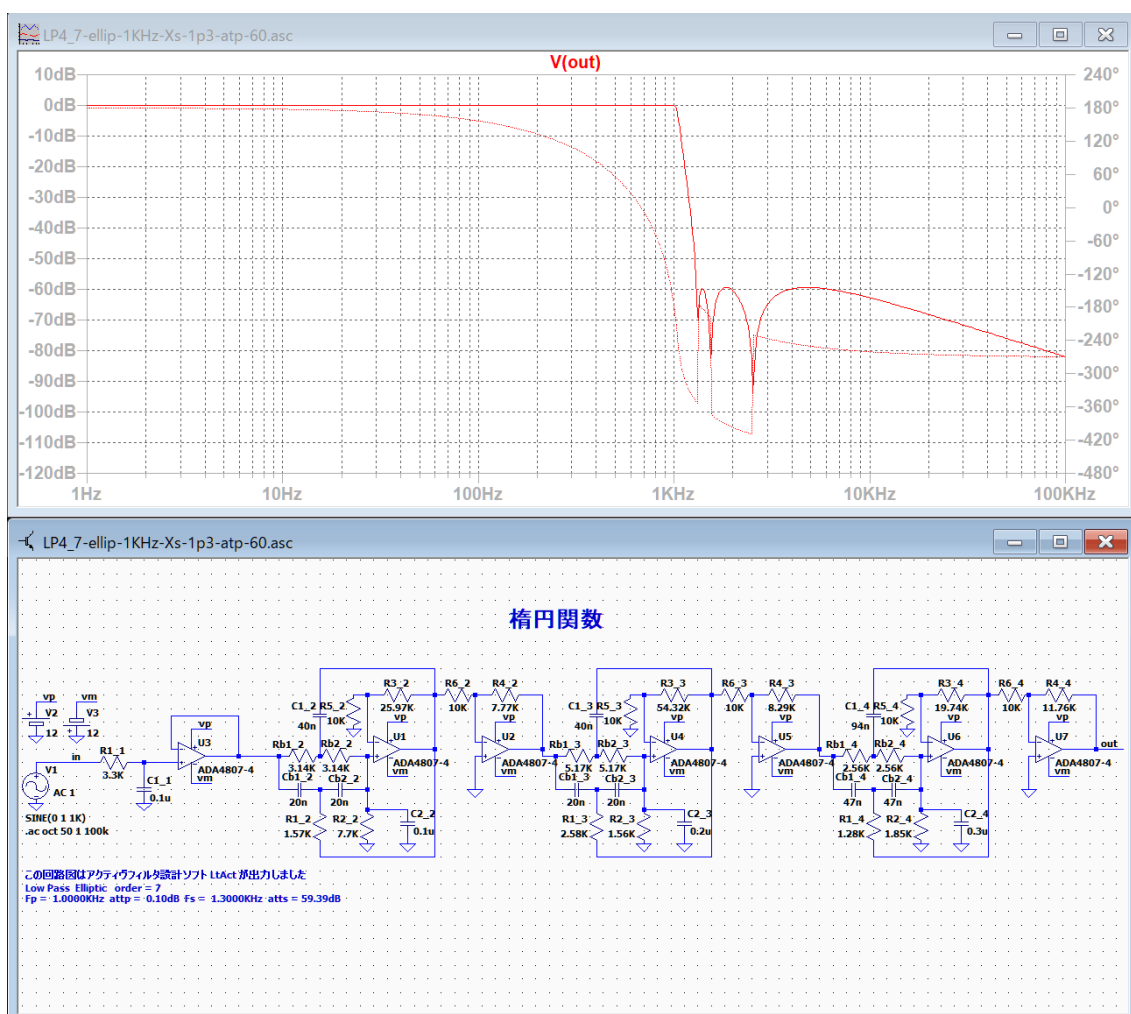
設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Elliptic
設計するフィルタの次数 $m(<=58)$	7		
カットオフ周波数 F_c	1	KHz	
周波数 F_c における減衰量又はリップル att_p	0.1	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$	1.3	倍	キャンセル

フィルターの次数が 10 次までは奇数次数の回路図が使用可能なので、7 次フィルターを設計した。
 Since odd-order circuit diagrams can be used for filter orders up to 10th order, a 7th-order filter was designed.



楕円関数の結果 Results of Elliptic Functions



楕円関数・フィルタでは次数は7次となり、
 減衰量は1KHzで0.02dB、1.3KHzで59.4dBとなる。

For the elliptic function filter, the order is 7,
 with attenuation of 0.02 dB at 1 kHz and 59.4 dB at 1.3 kHz.

比較例 2 Comparative Example 2

カットオフ周波数を 1KHz として、1KHz の減衰量を 3dB 程度として、1.3KHz における減衰量が 60dB 程度となるフィルタを設計する場合

When designing a filter with a cutoff frequency of 1 kHz, an attenuation of approximately 3 dB at 1 kHz, and an attenuation of approximately 60 dB at 1.3 kHz

バターワースフィルタの場合 In the case of the Butterworth filter

比較例 1 でオペアンプに AD8648 を使用した回路図を使用する。

Use the circuit diagram employing the AD8648 operational amplifier in Comparative Example 1.

設計パラメータの入力

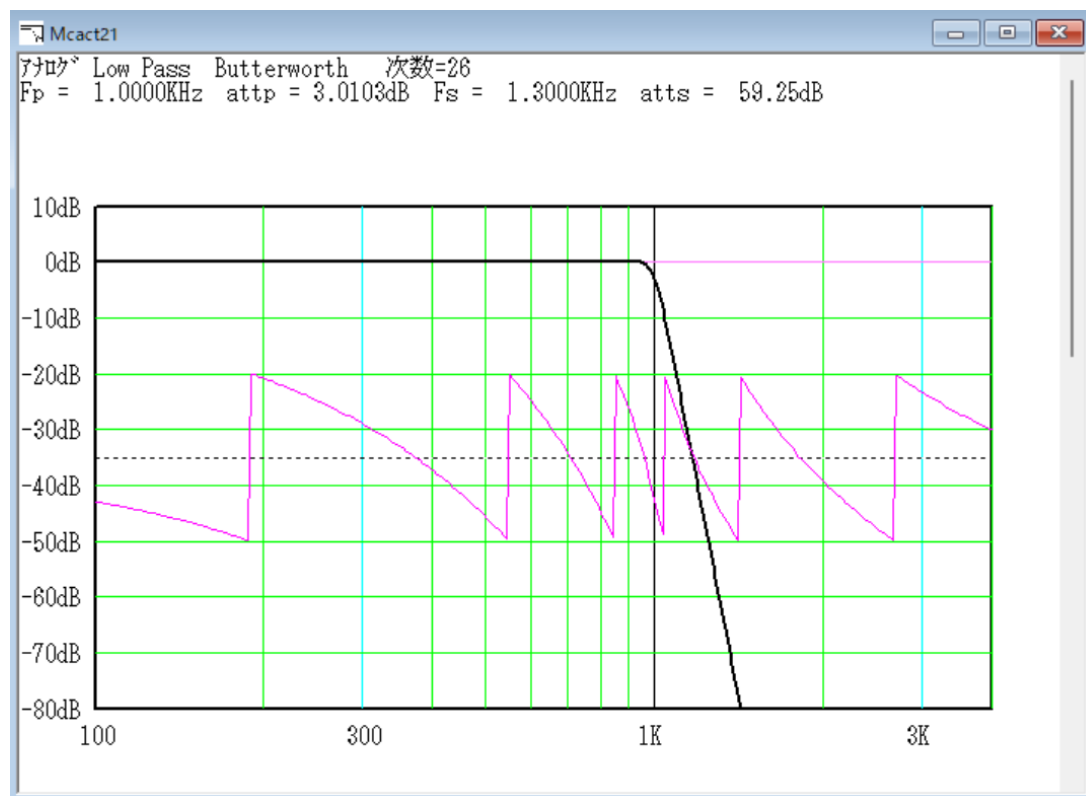
フィルタの種類 ローパスフィルタ 遮断特性 バターワース

設計するフィルタの次数 $m(\leq 58)$ 26

カットオフ周波数 F_c 1 KHz

最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$ 1.3 倍

OK キャンセル

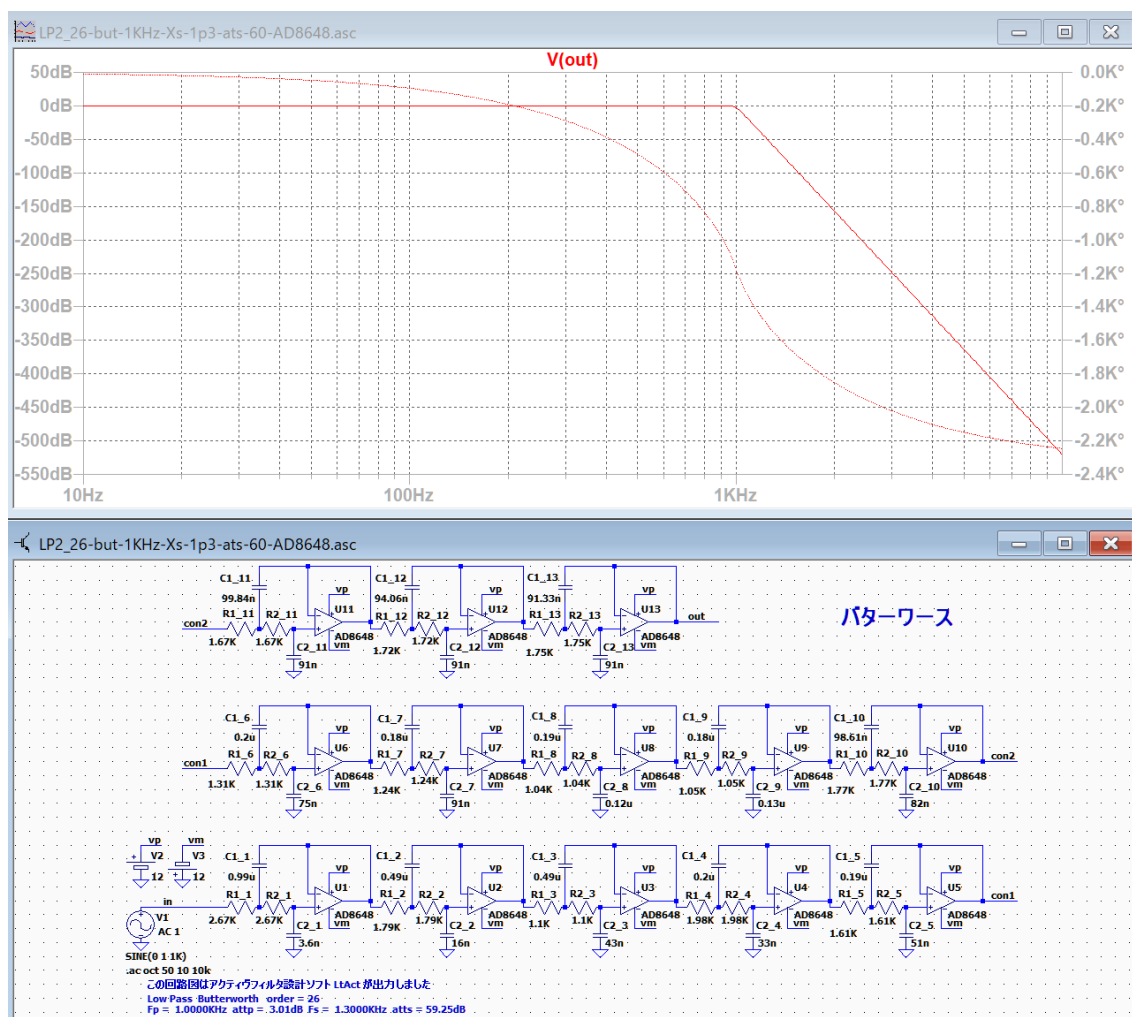


減衰量は 1KHz で 3.0dB、1.3KHz で 59.25 dB となる。

The attenuation is 3.0 dB at 1 kHz and 59.25 dB at 1.3 kHz.

バターワースフィルタの場合 In the case of the Butterworth filter

バターワースの結果 Butterworth's results



オペアンプを AD8648 に変更した。

バターワース・フィルタではフィルタの次数は 26 次となり、

減衰量は 1KHz で 3.0dB、1.3KHz で 59.4dB となる。

The operational amplifier was changed to the AD8648.

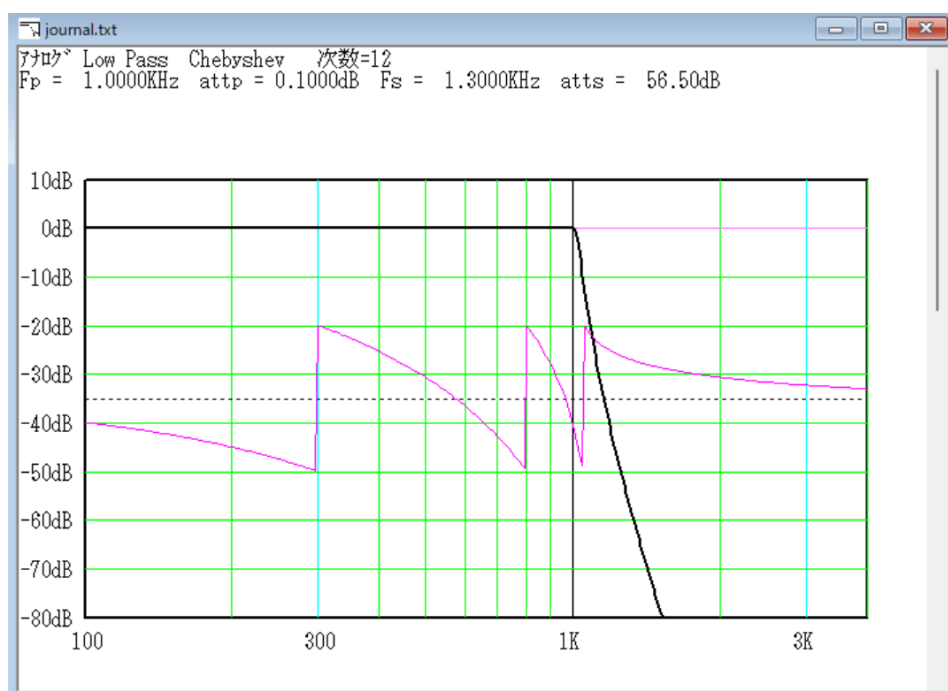
For the Butterworth filter, the filter order becomes 26th order,

with attenuation of 3.0 dB at 1 kHz and 59.4 dB at 1.3 kHz.

チェビシェフフィルタの場合 In the case of the Chebyshev filter

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 $m(<=58)$	12		
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、 $X_s = F_s/F_c$	1.3	倍	キャンセル



指定周波数におけるゲインの確認

指定周波数	1.0234	KHz
ゲイン	-3.0141	dB
位相角	-122.8208	度

確認 終了

減衰量が 3dB 程度になるのは 1.0234KHz なので、1KHz の減衰量が 3dB 程度になるようにカットオフ周波数を $1000/1.0234 = 977\text{Hz}$ に設定する。

1.3KHz で減衰量が 60dB 程度になるように、 X_s を $1300/977=1.33$ に変更する。

The attenuation reaches approximately 3dB at 1.0234kHz, so the cutoff frequency is set to $1000/1.0234 = 977\text{Hz}$ to achieve approximately 3dB attenuation at 1kHz.

To achieve approximately 60dB attenuation at 1.3kHz, X_s is changed to $1300/977 = 1.33$.

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

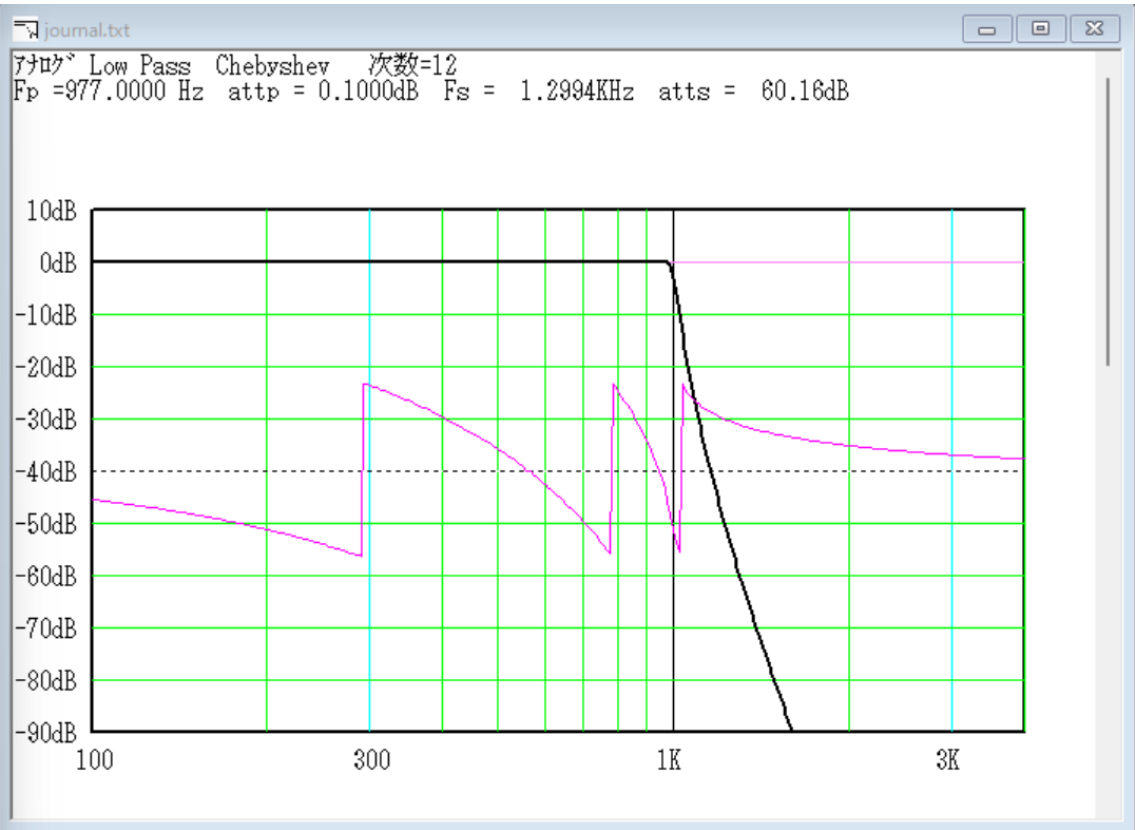
設計するフィルタの次数 $m(\leq 58)$ 12

カットオフ周波数 F_c 977 Hz

周波数 F_c における減衰量又はリップル att_p 0.1 dB

最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$ 1.33 倍

OKキャンセル



指定周波数におけるゲインの確認

指定周波数 1 KHz

ゲイン -3.0484 dB

位相角 -123.166 度

確認 終了

指定周波数におけるゲインの確認

指定周波数 1.3 KHz

ゲイン -60.1298 dB

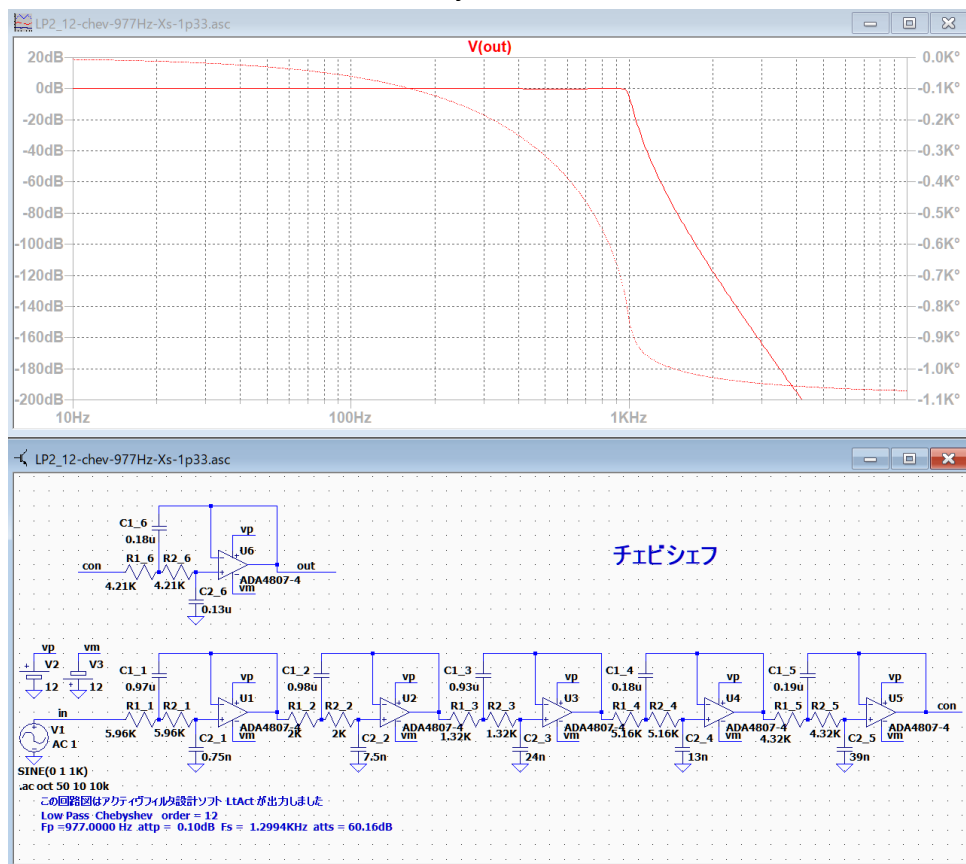
位相角 93.634 度

確認 終了

減衰量は 1KHz でで 3.05dB、1.3KHz で 60.1dB になる。

The attenuation is 3.05 dB at 1 kHz and 60.1 dB at 1.3 kHz.

チェビシェフの結果 Chebyshev's result



チェビシェフフィルタでは次数は12次になり、

減衰量は1KHzで4.7dB、1.3KHzで59.9dBとなる。

しかし、減衰量が3dBになるのは0.9912KHzなのでほぼ設計の通りです。

チェビシェフフィルタはカットオフ周波数付近の減衰量の変化が急峻なので、

1KHzでぴったり3dBを実現するのは困難です。

オペアンプの入力電流とR1_1などによって入力信号が低下する影響が考えられるので、オペアンプをJFETのAD8648に変更して周波数特性を確認します。

The Chebyshev filter has a 12th-order response,

with attenuation of 4.7dB at 1kHz and 59.9dB at 1.3kHz.

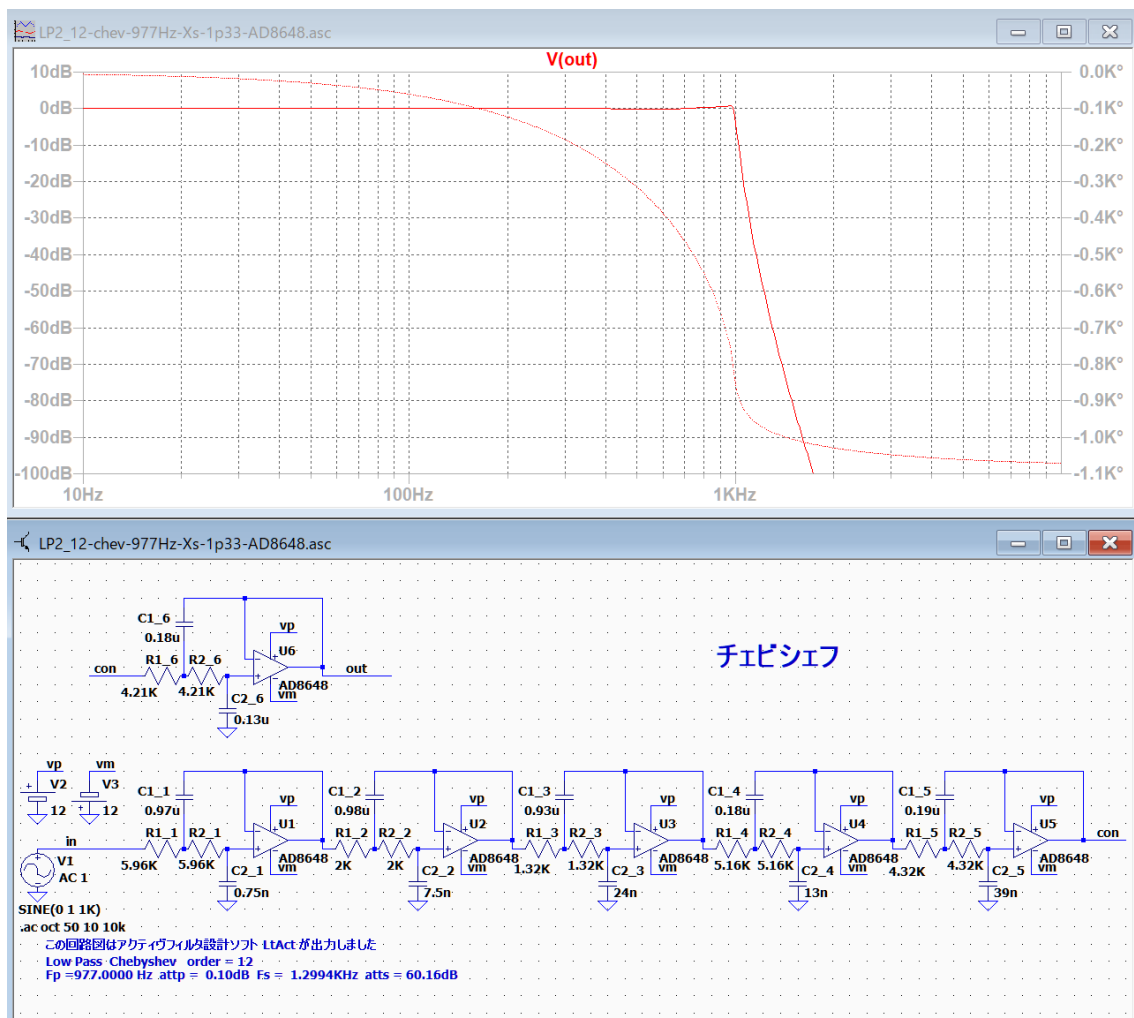
However, the 3dB attenuation point is 0.9912kHz, which is nearly as designed.

Since Chebyshev filters exhibit steep attenuation changes near the cutoff frequency, achieving exactly 3dB at 1kHz is difficult.

Considering the potential impact of input signal attenuation due to the op-amp's input current and components like R1_1, we will replace the op-amp with a JFET-based AD8648 and verify the frequency response.

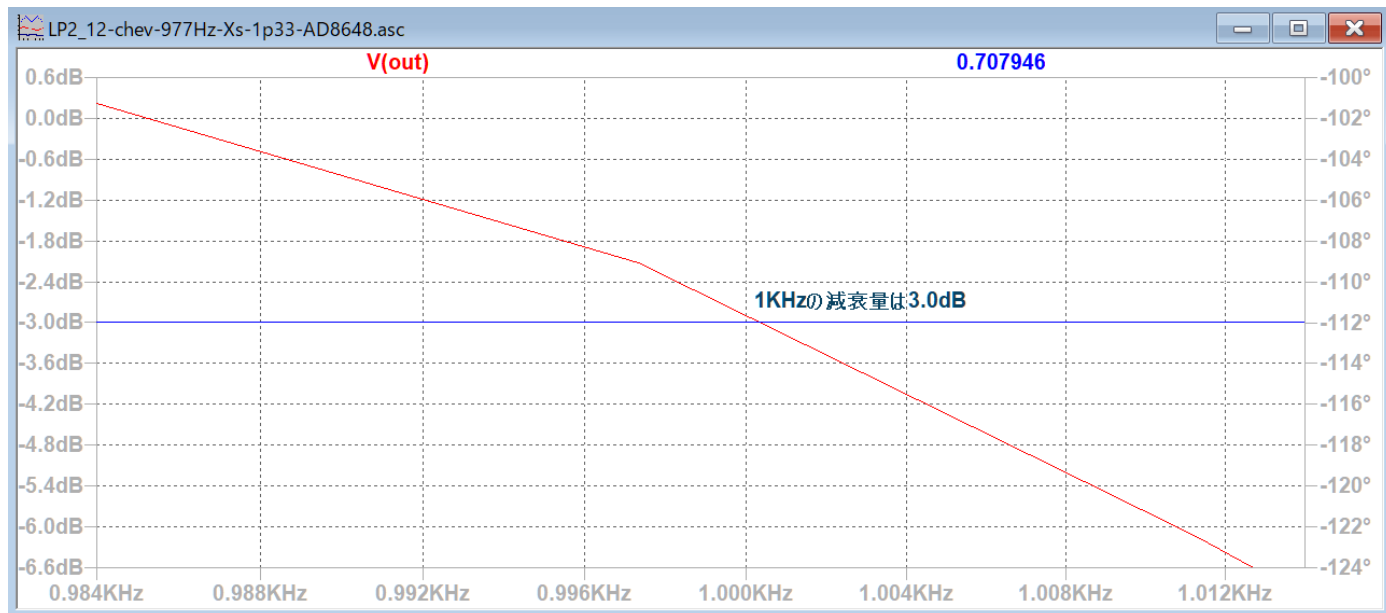
チェビシェフフィルタの場合 In the case of the Chebyshev filter

オペアンプを AD8648 に変更した結果 Results of changing the op-amp to AD8648

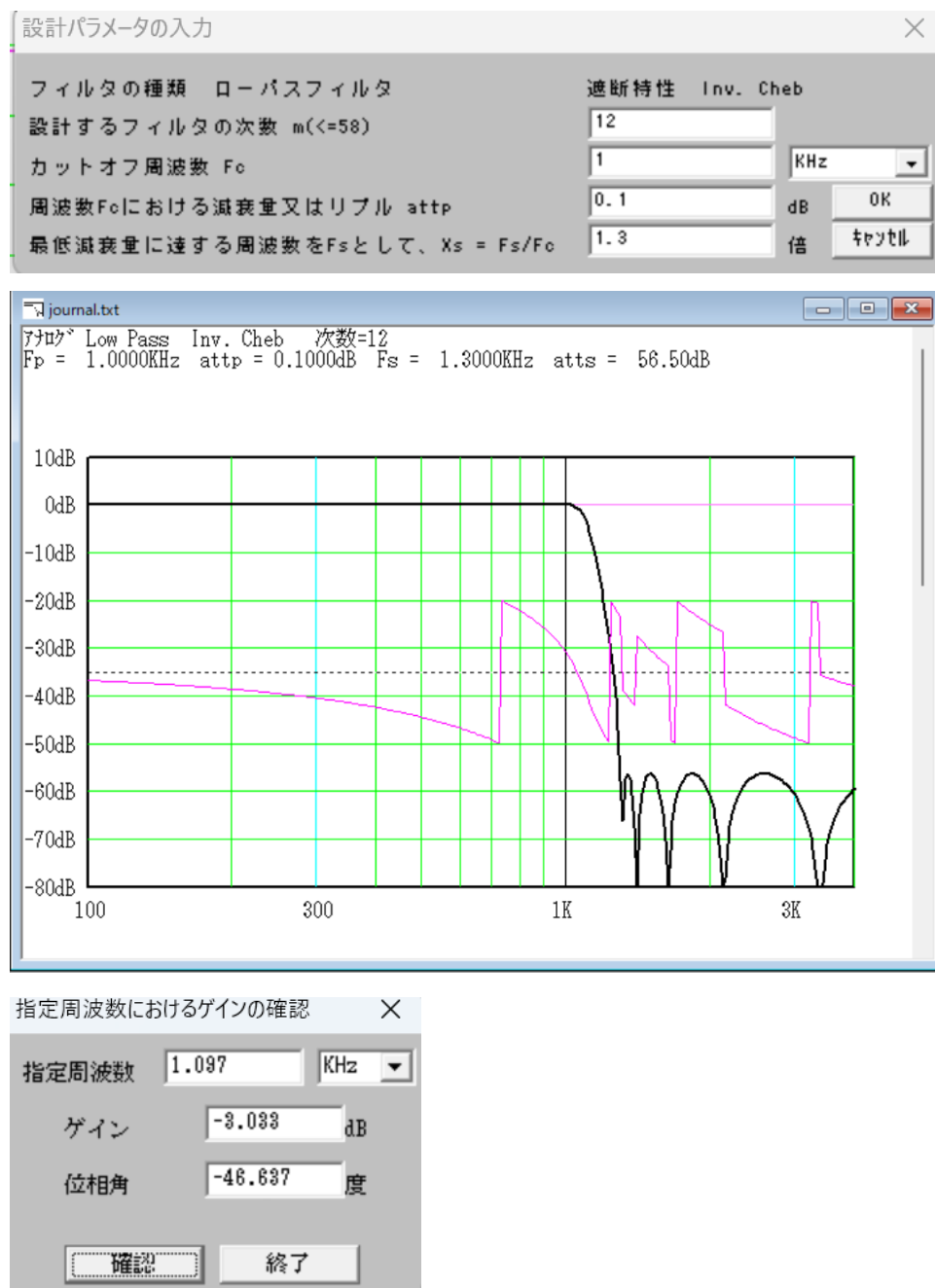


減衰量は、1KHz で 3.0dB、1.3KHz で 60.0dB になりました。

The attenuation levels were 3.0 dB at 1 kHz and 60.0 dB at 1.3 kHz.



逆チェビシェフフィルタの場合 In the case of the inverse Chebyshev filter



減衰量が 3dB 程度になるのは 1.097KHz なので、1KHz の減衰量が 3dB 程度になるようにカットオフ周波数を $1000/1.097 = 912\text{Hz}$ に設定して設計する。

1.3KHz で減衰量が 60dB 程度になるように、 X_s を $1300/912=1.425$ に変更する。

The attenuation reaches approximately 3dB at 1.097kHz, so the cutoff frequency is set to $1000/1.097 = 912\text{Hz}$ to achieve approximately 3dB attenuation at 1kHz.

To achieve approximately 60dB attenuation at 1.3kHz, X_s is changed to $1300/912 = 1.425$.

設計パラメータの入力

フィルタの種類 ローパスフィルタ

遮断特性 Inv. Cheb

設計するフィルタの次数 $m(\leq 58)$ 12

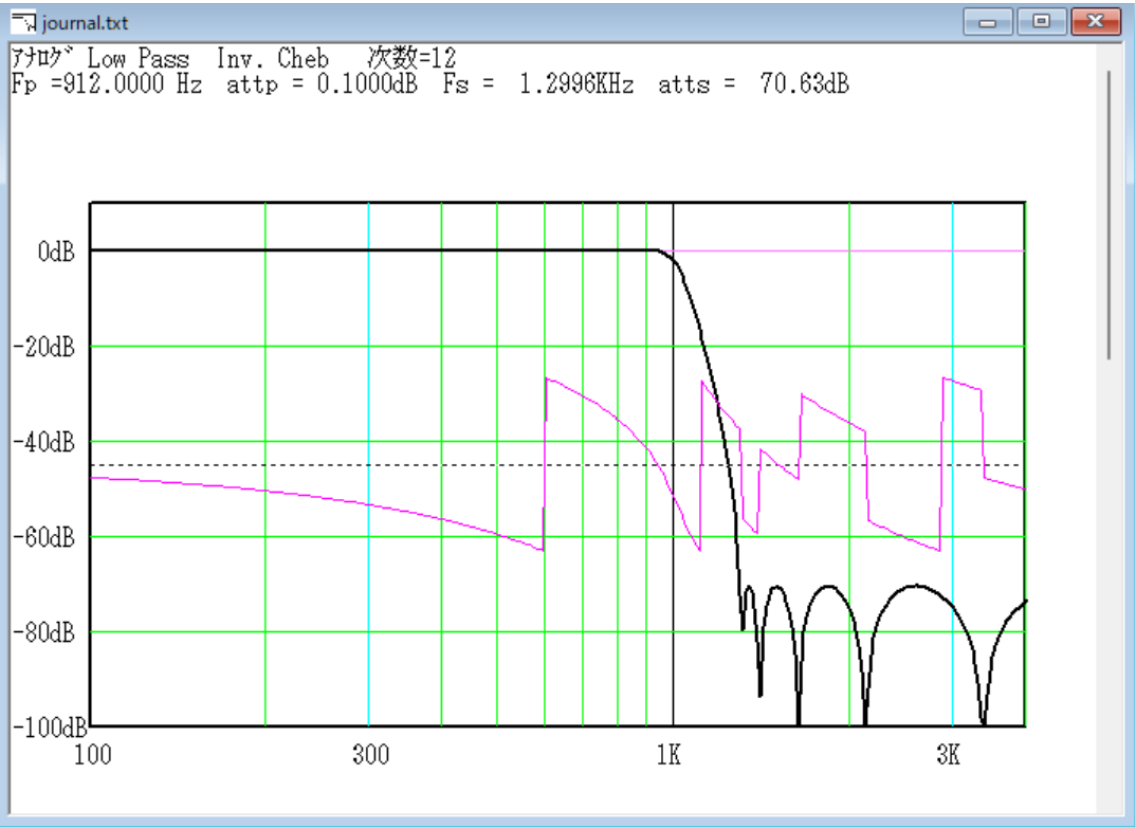
カットオフ周波数 F_c 912 Hz

周波数 F_c における減衰量又はリップル att_p 0.1 dB

最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$ 1.425 倍

OK

キャンセル



指定周波数におけるゲインの確認

指定周波数 1.013 KHz

ゲイン -3.0049 dB

位相角 -78.4603 度

確認

終了

指定周波数におけるゲインの確認

指定周波数 1.3 KHz

ゲイン -71.0243 dB

位相角 72.7024 度

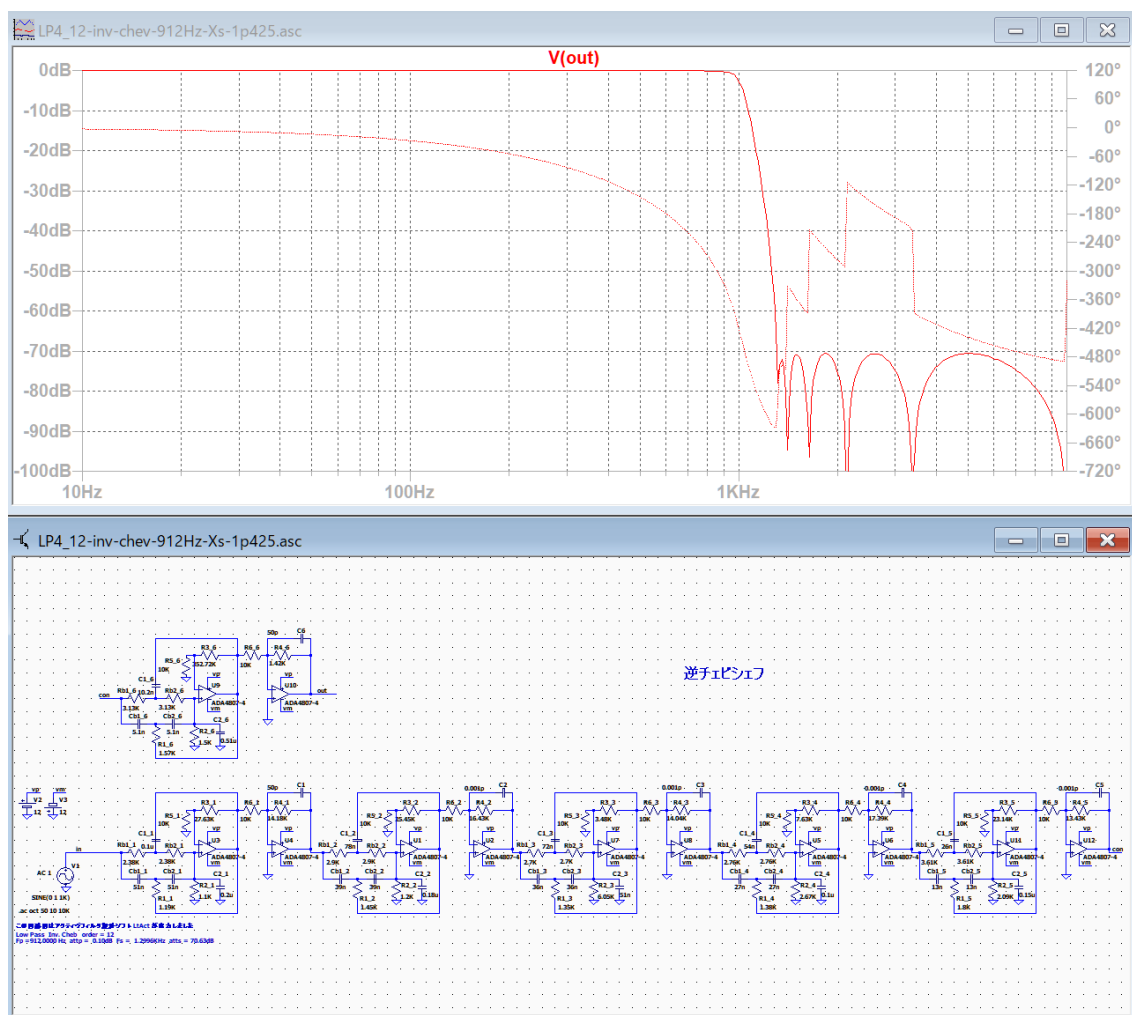
確認

終了

減衰量は 1.013KHz で 3.005dB、1.3KHz で 71dB になる。

Attenuation is 3.005 dB at 1.013 kHz and 71 dB at 1.3 kHz.

逆チェビシェフの結果 Reverse Chebyshev's Result



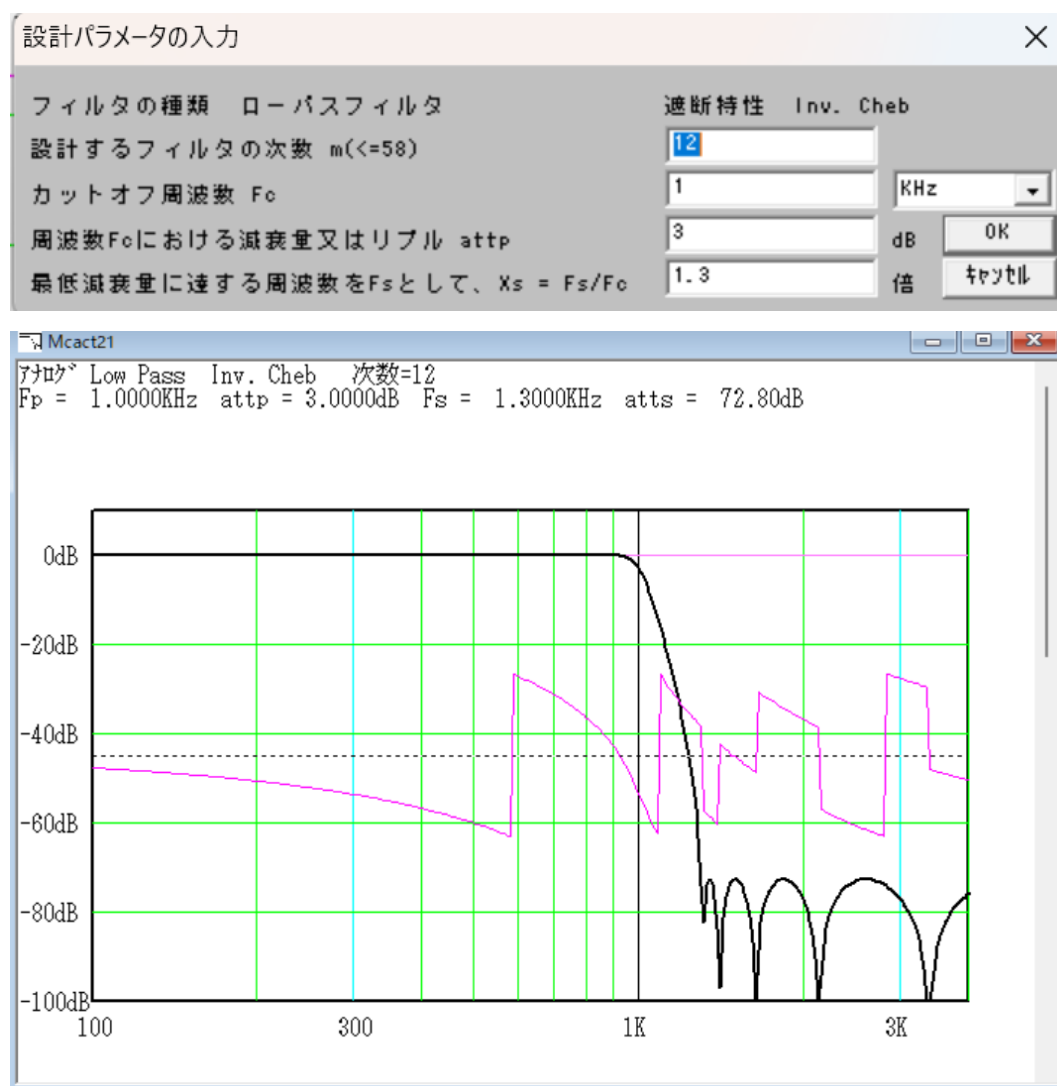
逆チェビシェフフィルタでは次数は12次になり、
減衰量は1KHzで2.5dB、1.3KHzで66.4dBとなる。
設計時は1.3KHzで71dBの予想だったが、5dB程度減衰量が低下した。

The inverse Chebyshev filter has a 12th-order response,
with attenuation of 2.5 dB at 1 kHz and 66.4 dB at 1.3 kHz.

The design prediction was 71 dB at 1.3 kHz, but the actual attenuation was reduced by about 5 dB.

逆チェビシェフフィルタの場合 In the case of the inverse Chebyshev filter

逆チェビシェフフィルタの場合 別の設計方法 For Inverse Chebyshev Filters: An Alternative Design Method



逆チェビシェフのパラメータ入力画面の リプル $attp$ は入力されるカットオフ周波数における減衰量を表わします。そして、 X_s はカットオフ周波数の X_s 倍の周波数で最低減衰量に達するフィルタが設計されます。

表示された、周波数特性のグラフの上部の情報より、

減衰量は、1KHz で 3dB、1.3KHz で 72.8dB になることが分かります。

The ripple $attp$ parameter input field in the inverse Chebyshev filter design represents the attenuation at the input cutoff frequency. The filter is designed to achieve minimum attenuation at a frequency equal to X_s times the cutoff frequency.

From the information at the top of the displayed frequency response graph, it can be seen that the attenuation is 3dB at 1KHz and 72.8dB at 1.3KHz.

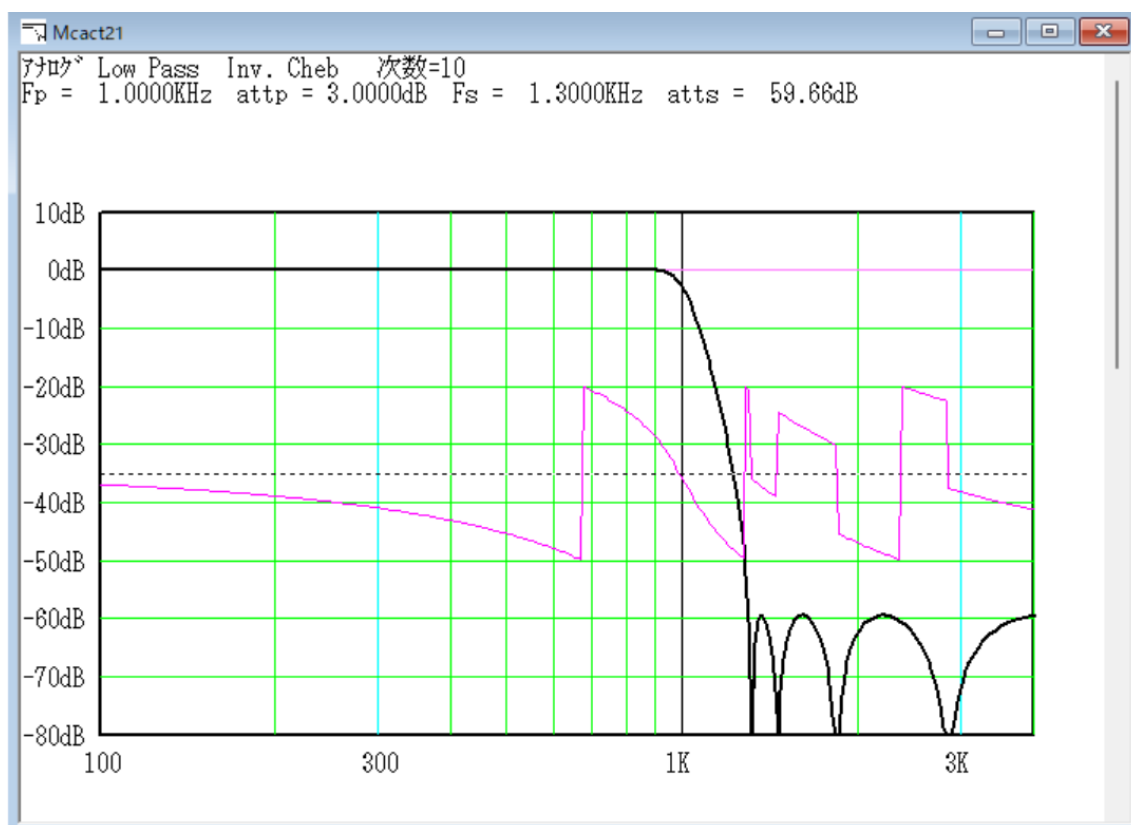
逆チェビシェフ・フィルタの場合 さらに別の設計方法 For the inverse Chebyshev filter, another design method

設計パラメータの入力

フィルタの種類	ローパスフィルタ	遮断特性	Inv. Cheb
設計するフィルタの次数 $m(<=58)$	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 att_p	3	dB	OK
最低減衰量に達する周波数を F_s として、 $X_s = F_s/F_c$	1.3	倍	キャンセル

フィルターの次数を 10 次に下げてみた。

I tried lowering the filter order to 10th.

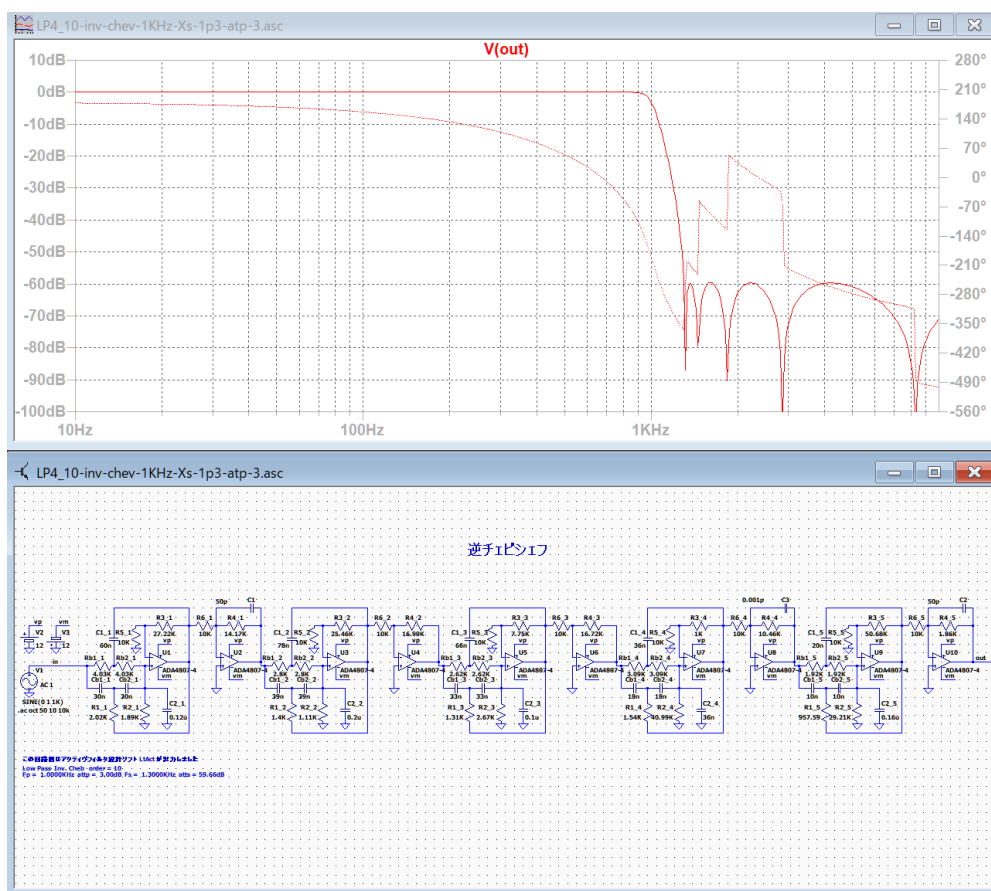


逆チェビシェフでは、次数を 10 次に下げても必要な減衰量が得られるようだ。

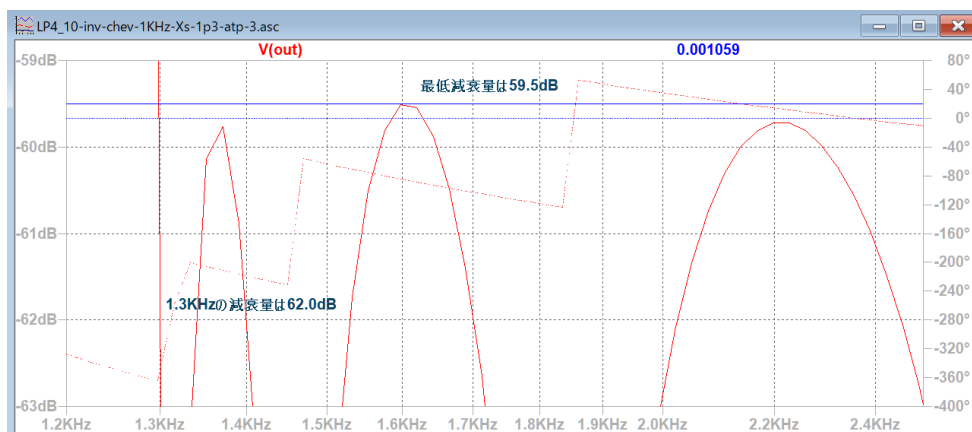
In the inverse Chebyshev case, it appears that the required attenuation can be achieved even when the order is reduced to 10th.

逆チェビシェフフィルタの場合 In the case of the inverse Chebyshev filter

逆チェビシェフの結果 さらに別の設計方法 Reverse Chebyshev Results: Another Design Method



逆チェビシェフフィルタでは次数は10次になり、
減衰量は1KHzで3.0dB、1.3KHzでは62dBだが、最低減衰量は59.5dBとなる。
The inverse Chebyshev filter has a 10th-order response,
with attenuation of 3.0 dB at 1 kHz and 62 dB at 1.3 kHz, but the minimum attenuation
is 59.5 dB.



逆チェビシェフフィルタの場合 In the case of the inverse Chebyshev filter

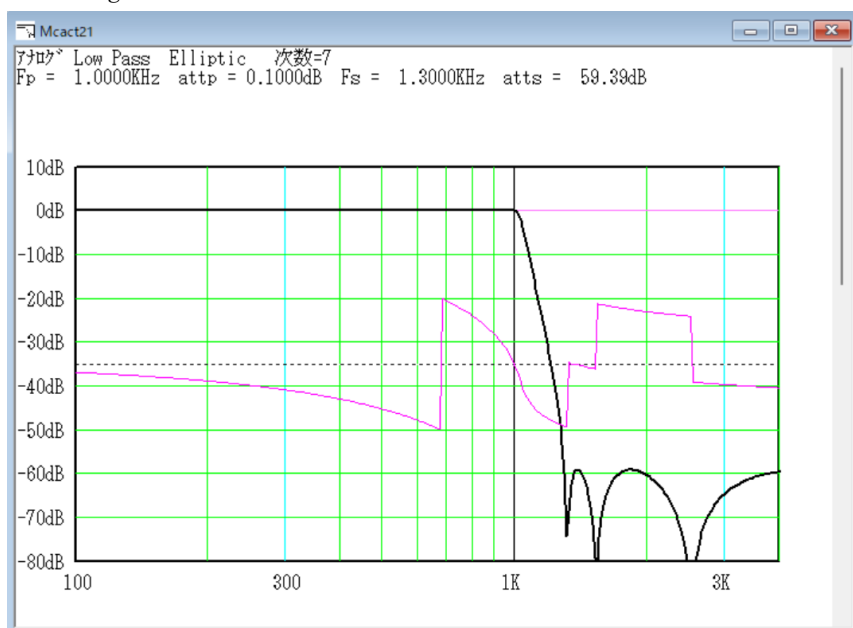
楕円関数フィルタの場合 In the case of elliptic function filters

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 $m(\leq 58)$	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、 $X_s = F_s/F_c$	1.3	倍	キャンセル

フィルターの次数が 10 次までは奇数次数の回路図が使用可能なので、7 次フィルターを設計した。

Since odd-order circuit diagrams can be used for filter orders up to 10th order, a 7th-order filter was designed.



指定周波数におけるゲインの確認

指定周波数	1.041	KHz
ゲイン	-3.0839	dB
位相角	-57.6782	度
確認		終了

減衰量が 3dB 程度になるのは 1.041KHz なので、1KHz の減衰量が 3dB 程度になるようにカットオフ周波数を $1000/1.041 = 961\text{Hz}$ に設定して設計する。

1.3KHz で減衰量が 60dB 程度になるように、 X_s を $1300/961=1.353$ に変更する。

The attenuation reaches approximately 3dB at 1.041kHz, so the cutoff frequency is set to $1000/1.041 = 961\text{Hz}$ to achieve approximately 3dB attenuation at 1kHz.

To achieve approximately 60dB attenuation at 1.3kHz, X_s is changed to $1300/961 = 1.353$.

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 $m(\leq 58)$

カットオフ周波数 F_c

Hz

周波数 F_c における減衰量又はリップル att_p

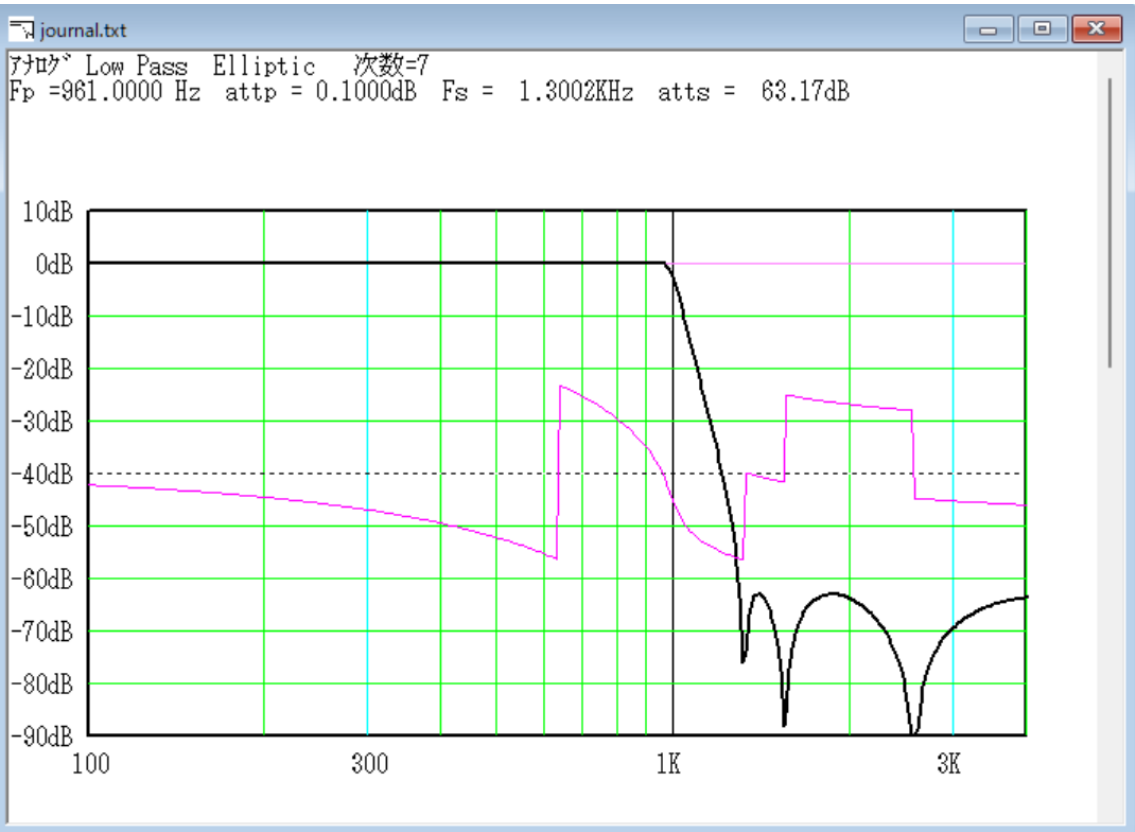
dB

OK

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

倍

キャンセル



指定周波数におけるゲインの確認

指定周波数

KHz

ゲイン

dB

位相角

度

確認 終了

指定周波数におけるゲインの確認

指定周波数

KHz

ゲイン

dB

位相角

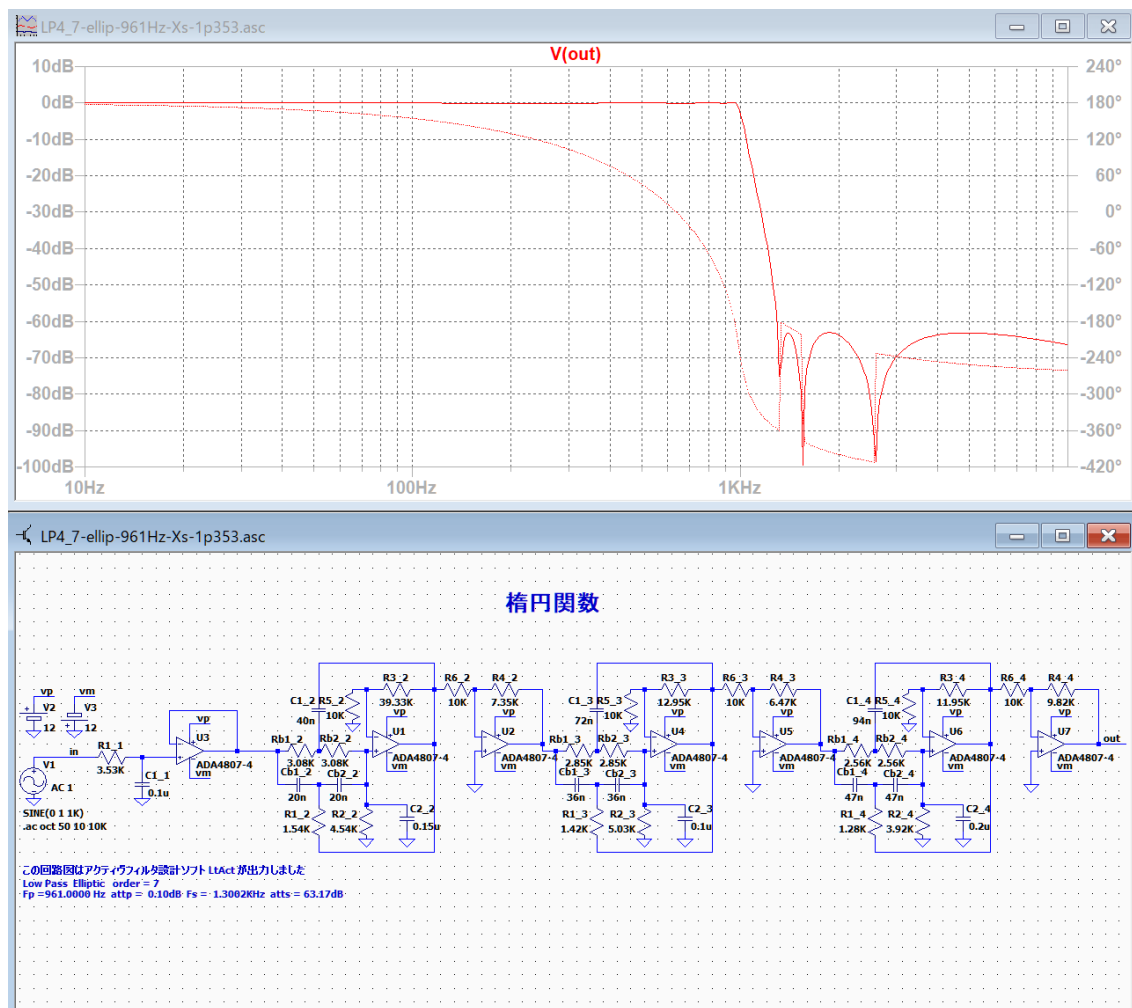
度

確認 終了

減衰量は 1.003KHz で 3.08dB、1.3KHz で 63dB になる。

Attenuation is 3.08 dB at 1.003 kHz and 63 dB at 1.3 kHz.

楕円関数の結果 Results of Elliptic Functions



楕円関数フィルターでは次数は 7 次になり、

減衰量は 1KHz で 2.4dB, 1.3KHz で 63.2dB となる。

1KHz の減衰量が 3dB にならないので、オペアンプを JFET の AD8648 に変更して、周波数特性を確認します。

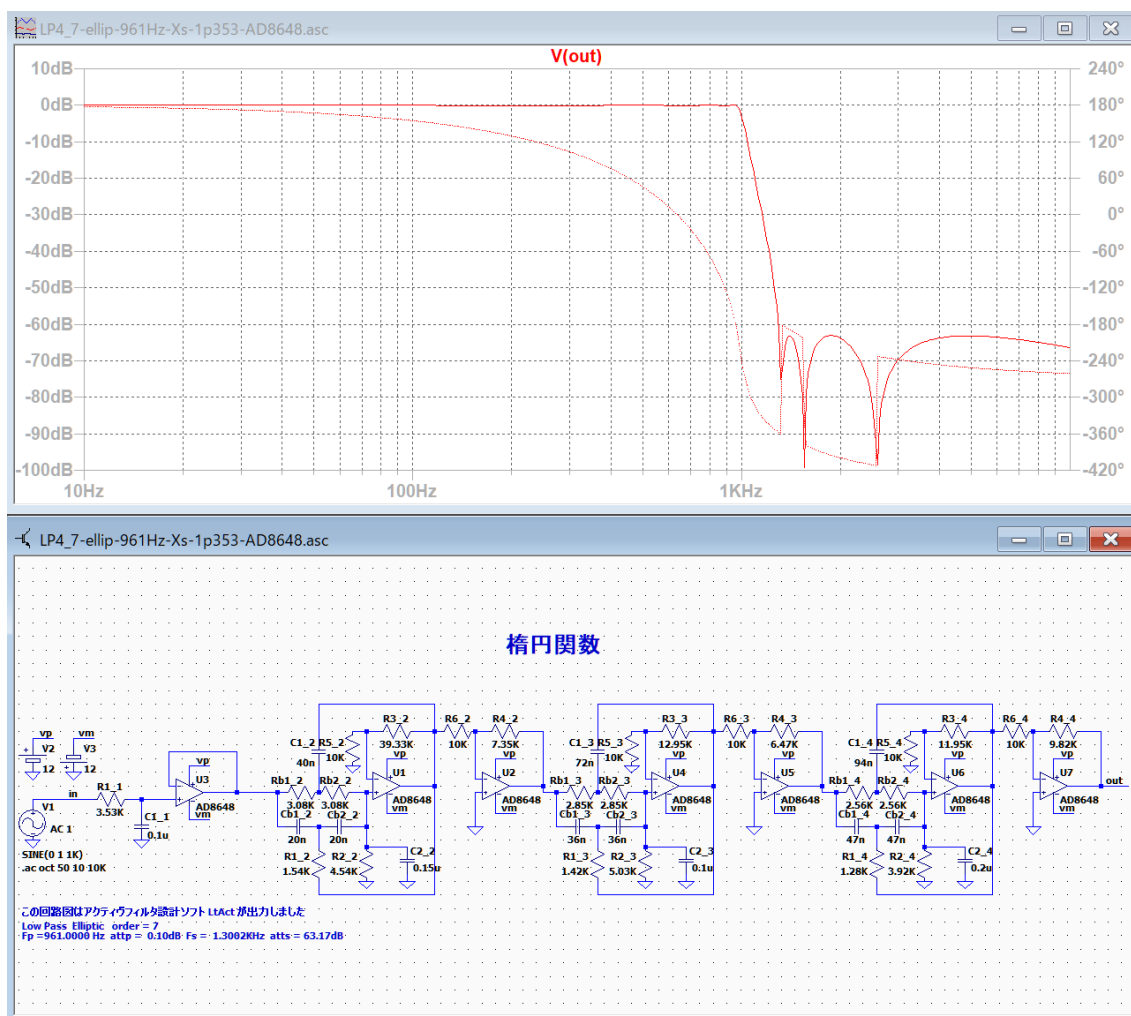
The elliptic filter has a 7th-order design,

with attenuation of 2.4 dB at 1 kHz and 63.2 dB at 1.3 kHz.

Since the attenuation at 1 kHz does not reach 3 dB, we will replace the op-amp with a JFET-based AD8648 and verify the frequency response.

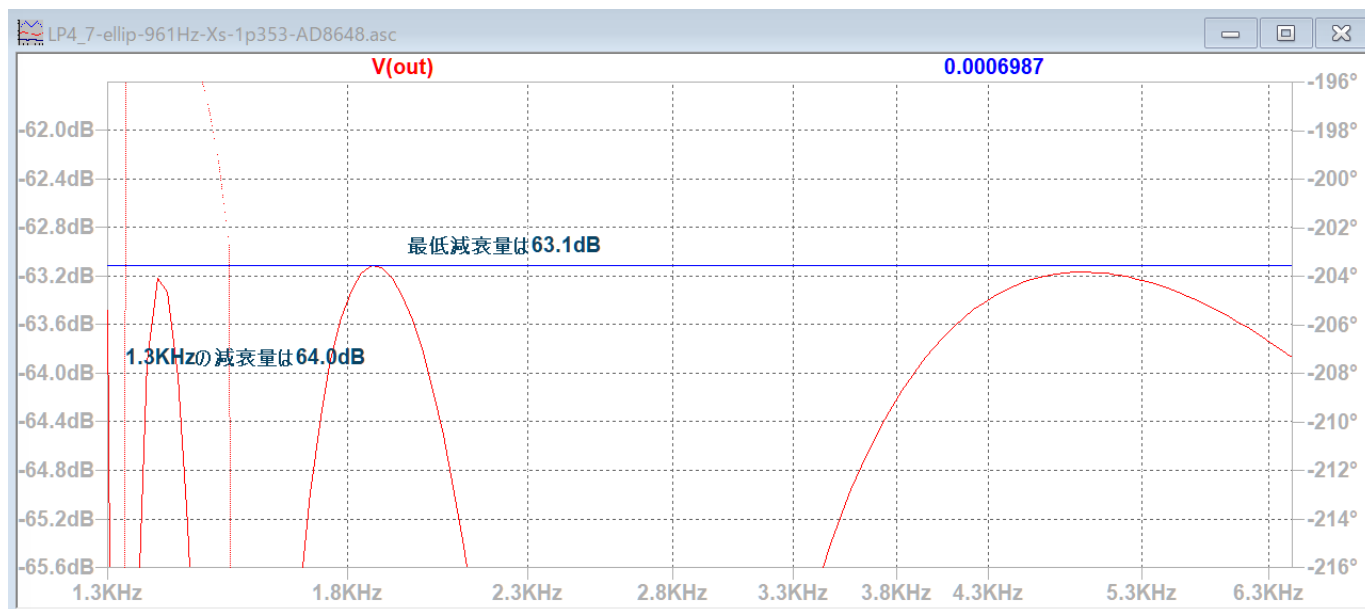
楕円関数フィルタの場合 In the case of elliptic function filters

オペアンプを AD8648 に変更した結果 Results of changing the op-amp to AD8648



減衰量は 1KHz で 3.0dB、 1.3KHz で 64.0dB となるが、最低減衰量は 63.1dB である。

Attenuation is 3.0 dB at 1 kHz and 64.0 dB at 1.3 kHz, but the minimum attenuation is 63.1 dB.



結果のまとめ Summary of Results

実験データはダウンロードしたフォルダの「減衰特性の比較 実験データ」に収納してあります。

The experimental data is stored in the folder “Comparison of Damping Characteristics - Experimental Data” within the downloaded folder.

比較例 1	フィルタの種類	次数	減衰量 1kHz (dB)	減衰量 1.3kHz (dB)
	バターワース	26	3.00	59.4
		34	-0.17	61.3
	チェビシェフ	12	-0.49	56.2
	逆チェビシェフ	12	0.50	56.2
	楕円関数	7	0.02	59.4

比較例 2	フィルタの種類	次数	減衰量 1kHz (dB)	減衰量 1.3kHz (dB)
	バターワース	26	3.00	59.4
	チェビシェフ	12	3.00	60.0
	逆チェビシェフ	12	3.00	72.5
		10	3.00	59.6
	楕円関数	7	3.00	63.1

比較例 1 では、12 次のチェビシェフと逆チェビシェフの 1.3kHz の減衰量は同等ですが、比較例 2 では、逆チェビシェフの 1.3kHz の減衰量はチェビシェフより 12dB 程度優れており、次数を 10 次になげても 1.3kHz の減衰量は 60dB 程度が得られます。

カットオフ周波数を 1kHz として、1.3kHz の周波数で 60dB 程度の減衰量を得るためには、バターワースでは 26 次が必要ですが、チェビシェフは 12 次、逆チェビシェフは 10 次となり、楕円関数ではわずか 7 次で必要な減衰量を得ることが出来ることが分かります。

In Comparison Example 1, the attenuation at 1.3 kHz is equivalent for Chebyshev and inverse Chebyshev filters.

In Comparison Example 2, the attenuation at 1.3 kHz is approximately 12 dB better for the inverse Chebyshev filter than for the Chebyshev filter.

Even when the order is reduced to 10th order, attenuation of approximately 60 dB is achieved at 1.3 kHz.

To achieve approximately 60 dB attenuation at 1.3 kHz with a cutoff frequency of 1 kHz, a Butterworth filter requires 26th order, while a Chebyshev filter requires 12th order and an inverse Chebyshev filter requires 10th order.

It can be seen that an elliptic function filter achieves the required attenuation with only 7th order.

Vector で公開中のソフトとデータ Software and data available on Vector

作者: 三浦 高志 (vector.co.jp)

汎用データ/画像&サウンド

- 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

- 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

- 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

- 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

汎用データ/学習&教育

- LTSpice 操作入門

アナログ電子回路のシミュレーション操作入門

- アクティブフィルタ 設計仕様と回路図

設計パラメータの役割

- アクティブフィルタの設計と合成

フィルタの伝達関数を回路の素子値に変換する方法を説明する

WindowsMe/98/95 用ソフト/学習&教育

- 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

- 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

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

- ActDoc

楕円関数フィルタの場合 In the case of elliptic function filters

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

● [ActiveFilter-Design-Schematics](#)

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

● [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

● [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

● [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

● [5ヶ国語-日記-構文解析付き](#)

読み進めると、文法が分かってくると思います

● [5ヶ国語-動詞の活用と英語 5 文型の拡張](#)

読み進めると、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-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-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-不思議の国のアリス](#)

スペイン語の翻訳に構文解析を追加しました 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-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

●[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

●[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

●[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・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

●[スペイン語学習](#)

構文解析によるスペイン語学習

●[中学生の英単語・構文解析](#)

例文に構文解析を追加した

●[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

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