

1 .	フィルタ概要	1
2 .	周波数領域のフィルタの種類	3
3 .	フィルタ特性を表すパラメータ	4
4 .	フィルタの遮断特性による種類	6
5 .	各種フィルタの位相 - 周波数特性	7
6 .	各種フィルタの群遅延特性と入出力波形	8
7 .	フィルタの次数	9
8 .	アンチエイリアシング・フィルタ	10
9 .	アクティブフィルタ概要	11
10 .	アクティブフィルタの基本回路	
10 - 1	2次LPF	13
10 - 2	1次LPF	16
10 - 3	2次HPF	17
10 - 4	1次HPF	18
10 - 5	1次対BPF	19
10 - 6	BEF	20
10 - 7	ステート・バリエブル・フィルタ	21
11 .	アクティブフィルタの設計方法	
11 - 1	$f_c$ :10kHz、5次バターワースLPF	24
11 - 2	$f_c$ :10kHz、リップル0.5dB、5次チェビシェフLPF	27
11 - 3	任意の容量比が使用できる $f_c$ :600Hz、4次バターワースLPF	28
11 - 4	基本回路Cによる $f_c$ :2kHz 4次バターワースLPFの設計演習	30
11 - 5	$f_c$ :10kHz、リップル0.5dB、5次チェビシェフHPF	31
11 - 6	基本回路Iで $f_c$ :500Hz 4次バターワース HPFの設計演習	32
11 - 7	アクティブBPF	33
11 - 8	基本回路Oによる $f_o$ :1kHz, $Q$ :2, バターワース2段BPF	34
11 - 9	基本回路Pによる $f_o$ :20kHz, $Q$ :10, チェビシェフ(0.25dB)3段BPF	36
11 - 10	基本回路Pによる $f_o$ :1kHz, $Q$ :10, 3段、バターワースBPF	37
11 - 11	基本回路Oによる $f_o$ :2kHz, $Q$ :3 バターワース2段BPFの設計演習	39
11 - 12	BPFと引き算回路で構成するBEF	40
11 - 13	基本回路Oを使用した $f_o$ :60Hz, $Q$ :6 BEF	41

1 2 .	LCフィルタの設計方法	4 2
1 2 - 1	遮断周波数100kHz 5次バターワース $R_s=RL:600$ LC・LPF	4 3
1 2 - 2	マイクロインダクタを使用した LC・LPF	4 4
1 2 - 3	LCHPFの設計方法	4 5
1 2 - 4	遮断周波数100kHz 5次バターワース $R_s=RL:600$ LC・HPF	4 5
1 2 - 5	LC・BPFの設計方法	4 6
1 2 - 6	中心周波数100kHz $Q:2$ 3次対チェビシェフ (1dB) $R_s=RL:600$ LC・BPF	4 6
1 2 - 7	LC・BEFの設計方法	4 8
1 2 - 8	中心周波数100kHz $Q:2$ 3次対バターワース $R_s=RL:600$ LC・BEF	4 8
1 2 - 9	信号源0 の LC フィルタ	5 0
1 2 - 1 0	信号源抵抗0 $f_c:20\text{kHz}$ 4次バターワース LC・LPF	5 1
1 2 - 1 1	FDNR フィルタ	5 2
1 2 - 1 2	FDNR $f_c:1\text{kHz}$ 5次バターワースLPF	5 4
1 2 - 1 3	FDNR $f_c:2\text{kHz}$ 7次チェビシェフ リップル0.25dB LPF	5 6
1 2 - 1 4	FDNRを使用した $f_c:2\text{kHz}$ 7次バターワース LPF の設計演習	5 8
Appendix 1	E 系列標準数	5 9
Appendix 2	アクティブ LPF 正規化表	6 0
Appendix 3	カスケード型 B P F 正規化表	6 4
Appendix 4	信号源抵抗と負荷抵抗が等しい 型T型 LC LPF 正規化表	6 7
Appendix 5	信号源抵抗0 の T型 LC LPF 正規化表	6 8

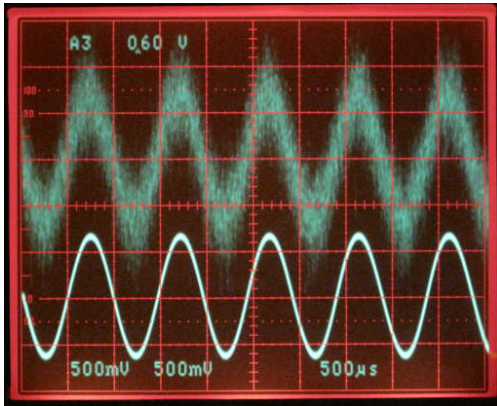
# 1. フィルタ概要

不要なものを取り除き必要なものだけを抽出するのがフィルタ

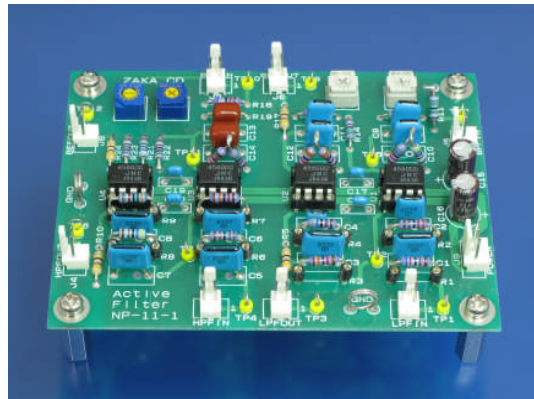
フィルタは電子回路以外の様々な分野でも使用されています。コーヒーを抽出するペーパーフィルタ、紫外線をカットするUVフィルタ等があります。

## 電子回路におけるフィルタ

今回のセミナーで扱うのは周波数領域のフィルタです。周波数領域以外にも到達時間によって選別する時間領域のフィルタや振幅で選り分けるスケルチ等もあります。



雑音を除去して信号を抽出



セミナーで使用するアクティブ・フィルタ基板

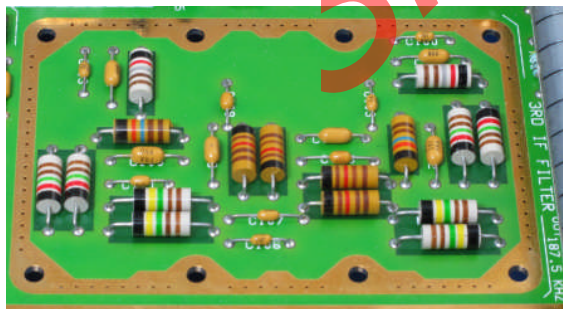


アクティブ・フィルタ



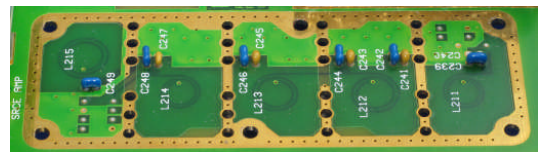
表面弾性波(SAW)フィルタ

## 計測器に使用されているLCフィルタ

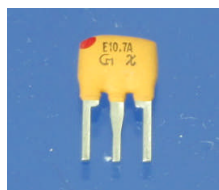


マイクロインダクタを使用(187kHz LPF)

プリントパターンでコイルを実現  
(150MHz LPF)

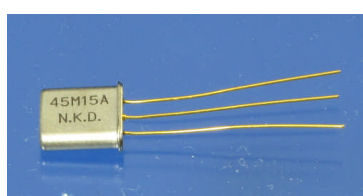


455kHz BPF



10.7MHz BPF

セラミックフィルタ



45MHz BPF

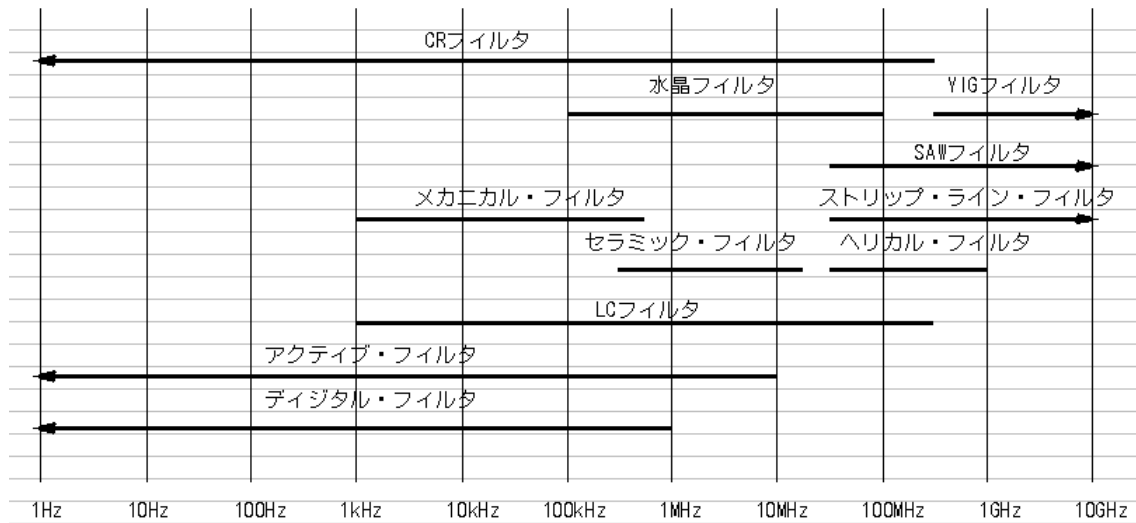


11MHz BPF

クリスタル・フィルタ

## 周波数領域のフィルタ

今回扱うのは下記のうち、CRフィルタ、LCフィルタ、アクティブ・フィルタの3種。



**RCフィルタ**：抵抗とコンデンサだけで構成するため急峻な遮断特性は実現できません。しかしmHzから集中定数での限界周波数である数100MHzの広範囲に使われています。

**LCフィルタ**：コイルとコンデンサの共振動作を利用するために急峻な遮断特性が実現できます。現在では10kHz～数100MHz程度の範囲で使用されています。

**アクティブ・フィルタ**：RCと能動素子(現在では殆どOPアンプを使用)で構成され、mHzから数MHzまで使用されています。

**メカニカル・フィルタ**：電話信号の多重化システムや無線機の間周波フィルタに使われていました。しかし現在では他のフィルタに取って代われ、あまり使用されていません。

**クリスタル・フィルタ**：無線機や計測器に使用されることの多いフィルタです。数MHzから100MHz程度まで製作でき、比較的特注の周波数でも応じてくれるようです。

**セラミック・フィルタ**：安価なためAMラジオやFMラジオの間周波フィルタとして大量に使用されています。ただし少量での特注は無理なようです。

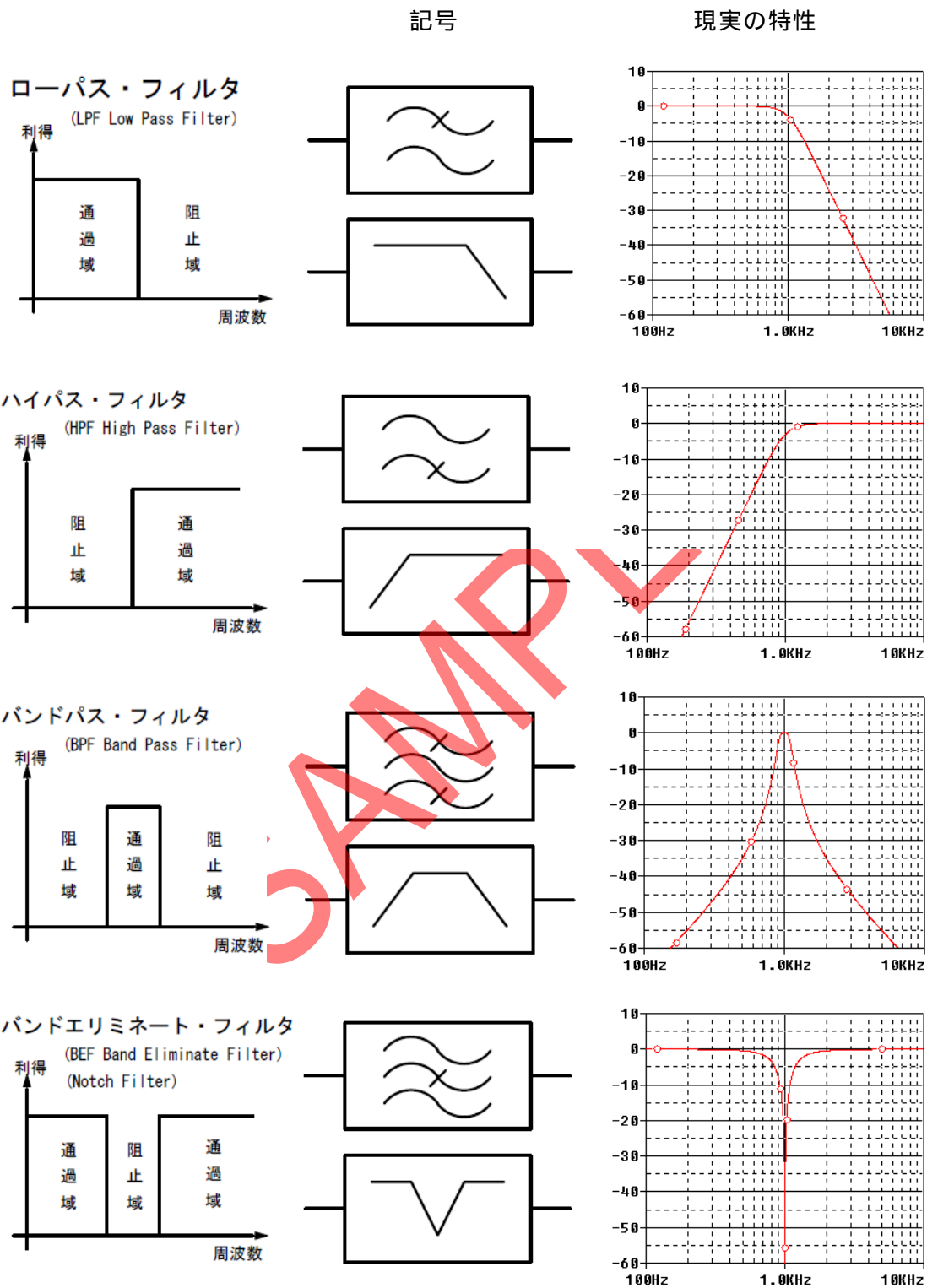
**表面弾性波フィルタ**：圧電基板上にくし形電極を配置し、表面弾性波を発生させ、その間隔によりフィルタ特性を得ています。テレビや携帯電話に使用されています。

**誘電体共振フィルタ**：誘電体セラミクスをドラム状に成形し、表面を導体として片端を開放した1/4共振器で構成されたフィルタです。UHF帯のBPFとして使われています。

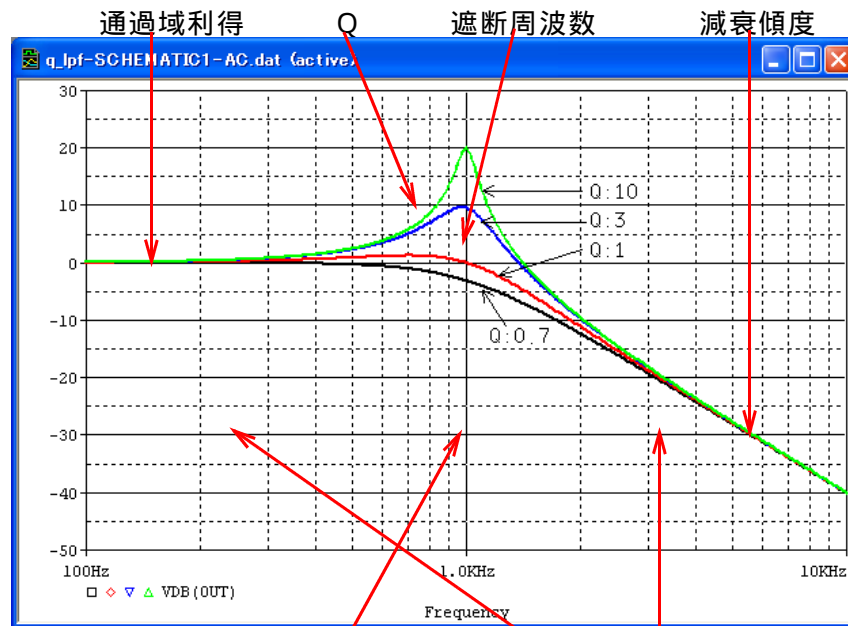
**YIGフィルタ**：Yttrium Iron Garnetの合金で作られた球の振動を利用したフィルタです。

## 2. 周波数領域のフィルタの種類

周波数領域によって分別するフィルタには下記の4つの種類があります。



### 3. フィルタ特性を表すパラメータ



フィルタは遮断周波数付近の遷移域を挟んで通過域と減衰域に分かれます。

#### 通過域利得

信号を通過する帯域の利得です。アクティブフィルタではOPアンプ等を使用するので利得は自由に設定できます。一方LCフィルタでは通常、信号源抵抗と負荷抵抗を一致させるため利得が半分の-6dBになります。信号源抵抗が0のタイプもありこの場合は通過利得が0dBになります。

#### 遮断周波数

通常、利得が-3dB低下する周波数で規定されます。正確には抵抗1個コンデンサ1個のRCフィルタを例にとると遮断周波数はCRの時定数で決定され、その値は $f_c = 1/2RC$ で、その周波数での利得は $1/\sqrt{2} = 0.707106 \dots = -3.0102 \dots$  dBになります。

ただし-3dBの低下では変動が多すぎ、許容できない用途もあり、その場合には用途により特定の減衰量を定め遮断周波数とします。

チェビシェフ・フィルタ等、通過域で利得の変動がある場合はその変動値での値を遮断周波数にする場合もあります。このように必ずしも「遮断周波数 = 利得が - 3dB低下する周波数」ではありません。

#### 減衰傾度

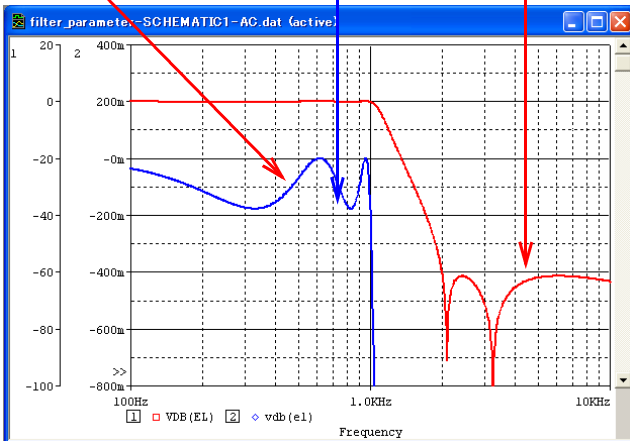
遮断周波数から減衰域に渡って利得が低下していく傾斜の度合いでdB/octまたはdB/decの単位で表されます。

dB/octは周波数が2倍(octave)になったとき利得が何dB変化するか、dB/decは10倍(deca de)での変化率です。したがって-6dB/octと-20dB/decは同じ傾斜になります。また正確には利得2倍は6.0205...dBです。

#### LPFとHPFのQ

遮断周波数付近の利得特性の急峻度を示し、Qが大きいと遮断周波数付近の利得の傾斜が急になります。そしてQが0.7よりも大きくなると遮断周波数付近の利得が通過域よりも大きくなり、Qが1以上では遮断周波数での利得の増加がQに比例します。

通過域リップル (拡大グラフ) 最大減衰量



通過域リップル

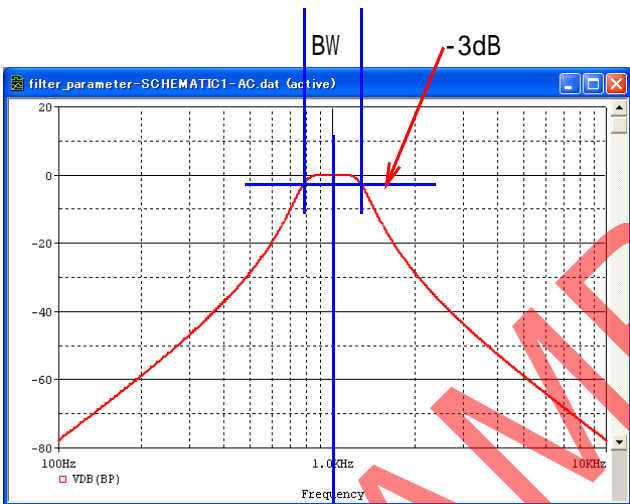
バターワース特性は通過域は平坦ですが、チェビシェフ特性やエリプティック特性では左図のように通過域の利得が変動します。この変動をリップルと呼んでいます。

同じ素子数ならばリップルを大きくするほど遮断周波数付近の利得が急峻な特性になります。

最大減衰量

規定された阻止域での確保できる減衰量です。

左図の場合2kHz～10kHzと規定すると最大減衰量が60dBです。



$$Q = f_o \div BW$$

$f_o$

BPFのQ

バンドパス・フィルタは通過域を挟んで両側が減衰域になります。

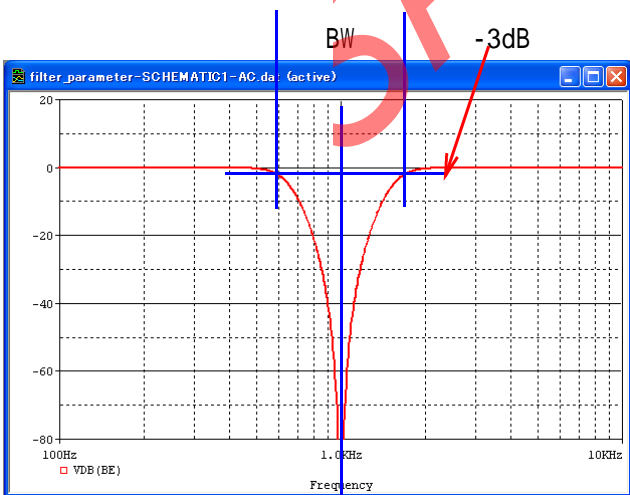
利得が3dB低下する両側の周波数までの通過帯域幅をBW(Band With)とすると、バンドパスフィルタの先鋭度を中心周波数 $f_o$ とすると $f_o/BW = Q$ (Qualityfactor)として表します。

BPFのシェイプ・ファクタ

通過帯域BWと規定の減衰量での帯域の比をシェイプ・ファクタと呼びます。シェイプファクタが小さいほど雑音除去能力は高く、1が理想値です。

左記のBPFを-3dBと-60dBでシェイプファクタを規定すると

$$\begin{aligned} & -3\text{dB}: 500\text{Hz}, -60\text{dB}: 5.8\text{kHz} \text{ なので} \\ & \text{シェイプファクタ} = 5.8\text{kHz} \div 500\text{Hz} \\ & = 11.6 \end{aligned}$$



$$Q = f_o \div BW$$

$f_o$

BEFのQ

バンドエリミネート・フィルタもBPFと同様に利得が3dB低下する帯域幅でQを規定しします。

#### 4. フィルタの遮断特性による種類

周波数領域のフィルタには遮断特性の形の違いから、下記の4つの種類があります。

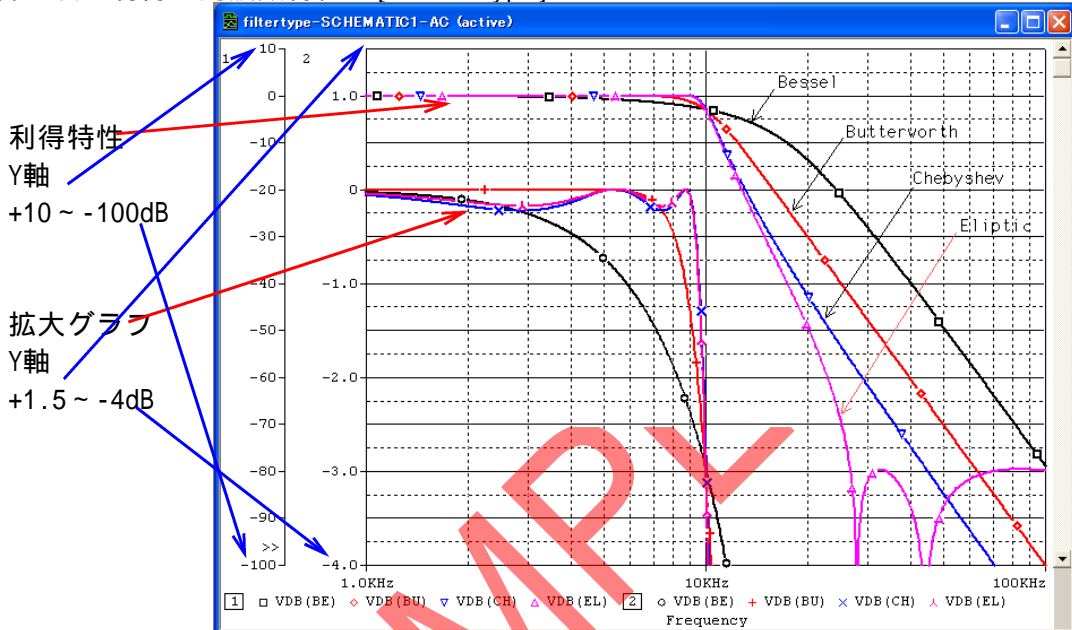
ベッセル特性(Bessel)：遮断特性がなだらかだが、過度応答特性が優れています。

バターワース特性(Butterworth)：通過域での平坦性に一番優れています。

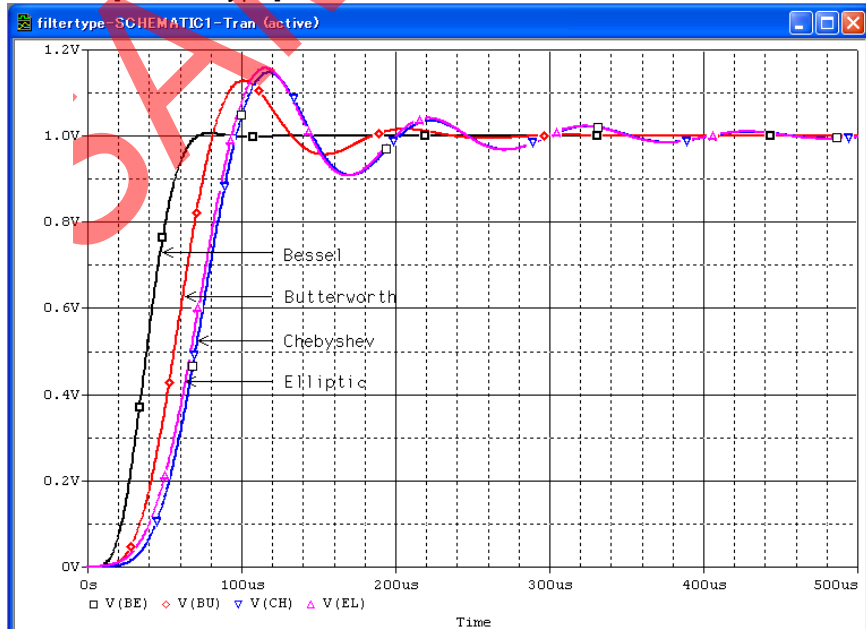
チェビシェフ特性(Chebyshev)：急峻な遮断特性が得られる。

連立チェビシェフ特性(Elliptic)：チェビシェフ特性にノッチ特性をもたせさらに急峻な遮断特性が得られる。

各特性5次の利得 - 周波数特性 [FilterType]



各特性5次の過度応答特性 [FilterType]



フィルタでは減衰特性を設けると、それにに応じて位相特性が影響を受けます。この位相特性による影響が顕著に現れるのが上図のステップ応答特性です。上図では入力信号を0Vから1Vに瞬時に立ち上げ、その出力波形を観測しています。時間遅れとともにフィルタ特性によってはオーバシュートやリングが生じています。