

アクティブフィルタ シミュレータの使い方 (初版)

S.Saito 2022.6.01~

1. 経緯.

1. 初めに

音声信号や比較的周波数の低い信号処理回路では LC 回路素子 (コイルやキャパシタ) ではサイズ的に大きすぎて実用になりません。アクティブフィルタは演算増幅器 (OPA) と CR (抵抗やキャパシタ) 構成されたため、低周波でもコンパクトに制作できます (デジタルフィルタは別)。今回、少ない回路素子数で構成できるサレン・キー型 (Sallen-Key:) フィルタの検討を行いました。この形式のフィルタは演算

増幅器 (OPA) によって前後の回路ブロックから完全に分離されるので、全体回路の伝達関数が個々の伝達関数の積で求められる (反射が無い)。HPF と LPF を単純に組み合わせて広比帯域の BPF が容易に得られます。これは LC 回路や分布定数回路にはない特徴です。なお実回路においては、必要な次数の回路のみで制作してください。

2. 構成

基本回路は 3 次回路と 2 次回路の組み合わせ、または 3 次回路を 2 次回路に変換して、2 次回路のみの

組み合わせる構成としました。

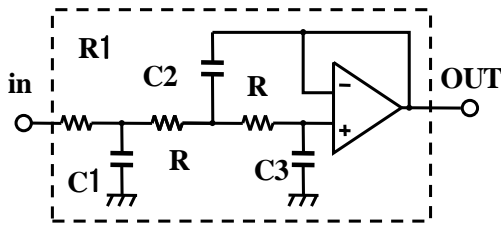


Fig.1 3次Active LPF

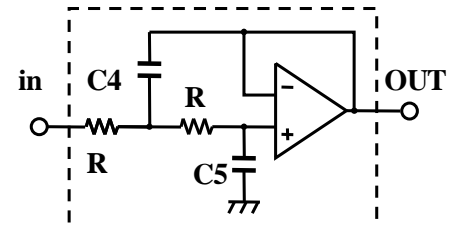


Fig.2 2次Active LPF

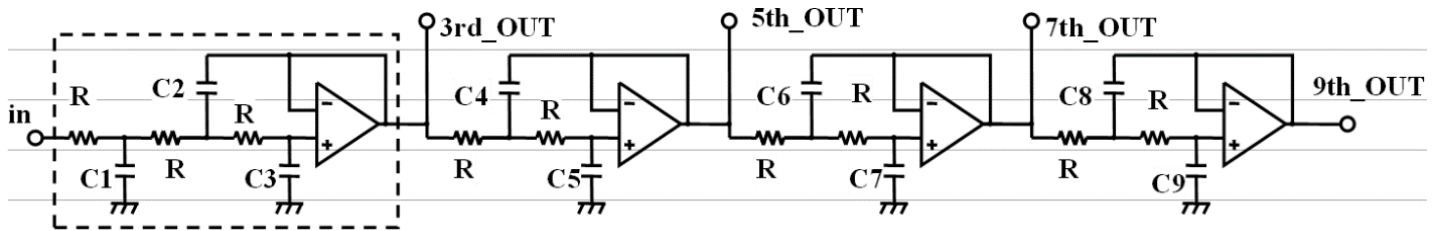


Fig.3 今回制作した LPF シミュレータの全体構成 (9 次まで対応)

3 次 LPF 部の伝達関数

$$H(\omega) = \frac{1}{[1 - C^2 \{R_1(R_2 + R_3) + R_3(R_1 + R_2)\} \cdot \omega^2] + j\omega C \{(2R_1 + R_2 + R_3) - C^2 R_1 R_2 R_3 \cdot \omega^2\}} \dots\dots\dots (1)$$

2 次 LPF の伝達関数

$$H(\omega) = \frac{1}{1 - C^2 R_1 R_2 \cdot \omega^2 + jC(R_1 + R_2) \cdot \omega} \dots\dots\dots (2)$$

Excel を使って数値処理を順々に行って「減衰量、通過位相、を求めるプログラム（シート）を作りました。

今回の内容は以下のものです。 使い難い点などをご指摘ください。

- ・ バターワース、チェビシェフ、ベッセル LPF
- ・ バターワース、チェビシェフ、ベッセル HPF

何れも 2、3、4、5、6、7、8、9 次までシミュレーションができます。

3. 使い方の手順

LPF を例にとって説明します。Excel による LPF シミュレーションファイルは 4 つの構成となっています、

LPF 設定部 | E 系列丸め | 定数表 | LPF 演算部

LPF 設定部、E 系列丸め部、定数表（フィルタ特性を決めるパラメータ）、LPF 演算処理部よりなる 4 枚のシートから構成されています。

3-1. 設定部

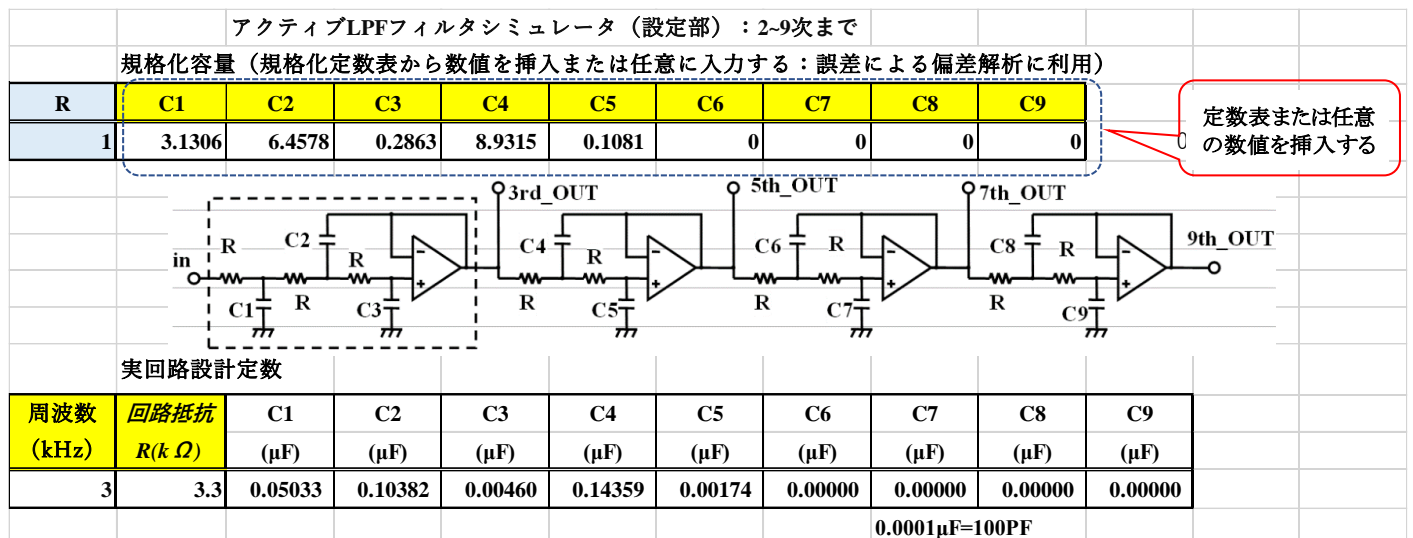


Fig.4 5 次 LPF の設定例

・フィルタの次数やパラメータを設定します。定数表からコピーすると便利です。フィルタ特性は自動的に更新されます。異なった値も入力できますの

で、任意の調整や誤差解析に便利です。精密な数値は演算部のシートから読み取ります。

実回路設計定数欄

・制作する時の周波数（通過遮断：kHz）と回路抵抗（公称値：kΩ）を入力することで、実機を混む時の容量値（μF）抵抗値（kΩ）が自動的に計算さ

れます。入力可能なセルできるのは規格化容量と周波数、回路抵抗の欄のみで、他の欄は保護されています。

3-2. E 系列丸め

実際の電子回路では入手可能な電子部品の数値は E 系列（等比数列）で規格化されていますので、CR 部品の定数が E 系列でしか供給されません、必ず誤差が生じます。それゆえ、E 系列で丸めた場合の特

性が確認出来るようにしました。丸め値を規格化容量値に変換する Excel シートを追加しました。ここでは E 系列で丸めた場合の規格化容量を自動的に

計算します。丸めた規格化容量を設定部に入力すればその条件のフィルタ特性が求められます。



Fig.5 LPF シミュレータの全体構成と E 系列 (5 次の設定例)

入力できるのは E 系列丸め回路定数、丸め規格化容量です。丸め規格化容量は計算式でコピーして、設定シートの規格化容量へ数値の貼り付けに便利な様に保護を掛けていません。取扱いに注意してください。本シートは複製を取っておいでもいでしょう。他の欄は保護されています。

3-3. 定数表

予め準備したフィルタの形式 (バターワース、チェビシェフなど) と次数 (2次から9次まで) を準備しています。この表は保護を掛けていませんので、書き換えしない様に注意してください。ここでは一例のみ示します。

チェビシェフ型LPF (0.5dB)											
N	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	
2	0	1.4029	0.4701	0	0	0	0	0	0	0	
3	1.916	9.5673	0.0762	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	2.3622	1.1878	5.7028	0.1649	0	0	0	0	0	
5	3.1306	6.4578	0.2863	8.9315	0.1081	0	0	0	0	0	
6	0	3.4507	1.8489	4.7138	0.3596	12.878	0.0759	0	0	0	
7	4.3531	7.7419	0.4562	6.261	0.236	17.5420	0.0561	0	0	0	
8	0	4.5601	2.4905	5.379	0.5184	8.0503	0.1676	22.925	0.0431	0	
9	5.5804	9.3946	0.6149	6.5796	0.3359	10.08	0.1257	29.025	0.0341	0	
10	0	5.677	3.1299	6.393	0.6679	7.9296	0.2371	12.35	0.0981	35.843	0.0277

g.6 LPF シミュレータの全体構成と E 系列 (5 次の設定例)

図において 0 の欄は CR の値が自動的に 0、すなわち回路が存在しない様プログラムされています。

2 次の回路を追加してください。5 次 LPF の最終回路は以下の様になります。

10 次の欄は今回含めません。 制作する際は新たに

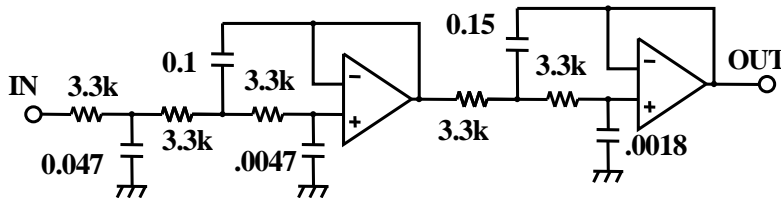


Fig. 5次チェビシェフアクティブLPF 最終回路

3-4. LPF 演算部

フィルタ特性を計算するためのシートで精密な数値を読み取る時に使います。シミュレータの心臓

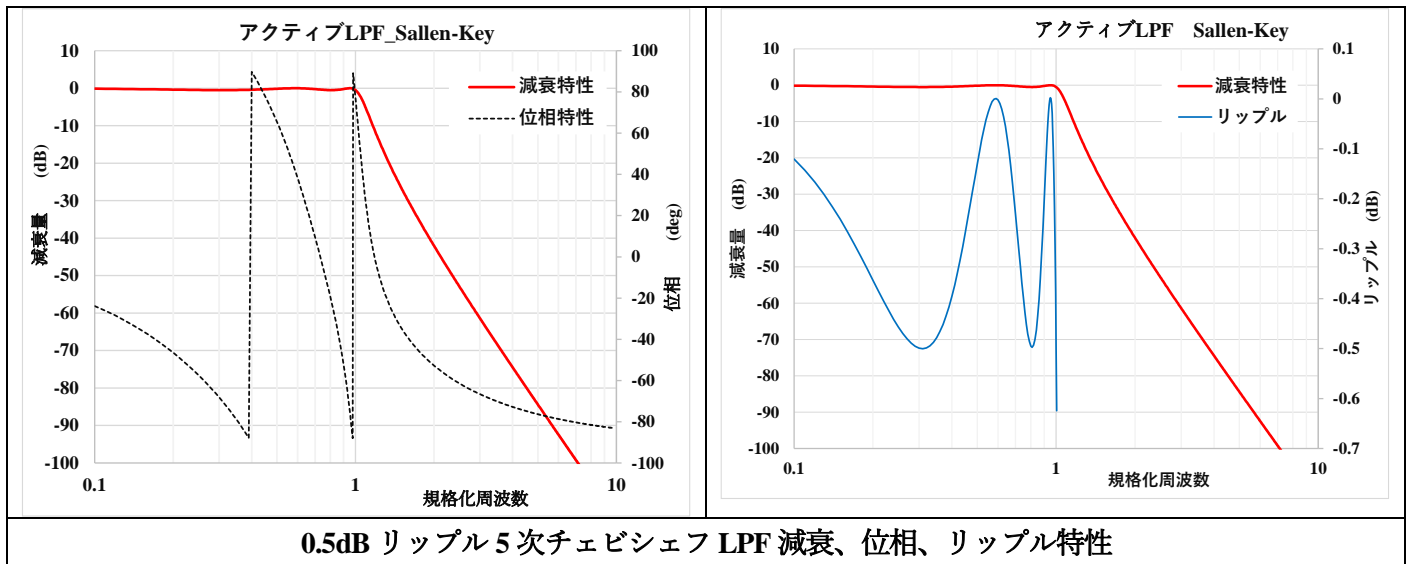
部ですので手を触れることは出来ません。 全体が保護されています。 ほんの一部を紹介します。

アクティブLPFフィルタシミュレータ (演算部) : 2-9次まで										途中出力(dB)												
R1	C1	C2	C3	C4	D5	C6	C7	C8	C9	OUT1(dB)	OUT1(dB)	OUT2(dB)	OUT3(dB)									
1	3.1306	6.4578	0.2863	8.9315	0.1081	0	0	0	0	-13.69175	12.618937	-0.498098	-0.498098									
										掛け算結果1						掛け算結果2		掛け算結果3		減衰特性	リップル	位相
ω	Re1	Im1	Re2	Im2	M1(Re)	M1(Im)	Re3	Im3	M2(Re)	M2(Im)	Re4	Im4	M3(Re)	M3(Im)	減衰特性	リップル	位相					
1	-4.490318	-1.798567	0.0345049	0.2162	0.2339124	-1.032866	1	0	0.2339124	-1.032866	1	0	0.2339124	-1.032866	-0.498098		77.239518					
1E-10	1	3.99E-10	1	2.162E-11	1	4.206E-10	1	0	1	4.206E-10	1	0	1	4.206E-10	0		-2.41E-08					
0.1	0.9450968	0.3931619	0.990345	0.02162	0.9274718	0.409799	1	0	0.9274718	0.409799	1	0	0.9274718	0.409799	-0.120519	-0.120519	-23.83801					
0.11	0.9335672	0.4311411	0.9883175	0.023782	0.9124074	0.4483064	1	0	0.9124074	0.4483064	1	0	0.9124074	0.4483064	-0.142961	-0.142961	-26.16694					
0.12	0.9209394	0.4687382	0.9860969	0.025944	0.8959745	0.4861141	1	0	0.8959745	0.4861141	1	0	0.8959745	0.4861141	-0.166479	-0.166479	-28.4822					
0.13	0.9072136	0.5059186	0.9836831	0.028106	0.8781914	0.5231618	1	0	0.8781914	0.5231618	1	0	0.8781914	0.5231618	-0.190824	-0.190824	-30.78337					
0.14	0.89223898	0.5426475	0.9810763	0.030268	0.8590776	0.5593895	1	0	0.8590776	0.5593895	1	0	0.8590776	0.5593895	-0.215742	-0.215742	-33.07022					
0.15	0.8764678	0.5788903	0.9782764	0.03243	0.8386544	0.5947385	1	0	0.8386544	0.5947385	1	0	0.8386544	0.5947385	-0.240976	-0.240976	-35.34267					
0.16	0.8594479	0.6146121	0.9752833	0.034592	0.8169445	0.6291509	1	0	0.8169445	0.6291509	1	0	0.8169445	0.6291509	-0.266269	-0.266269	-37.60083					

Fig.6 LPF シミュレータ演算部の一部 (5 次チェビシェフ LPF、0.5dB の設定例)

回路ごとの伝達関数 (複素数) を掛け算し、最終掛け算結果 3 から減衰量と位相を算出します。周波数 $\omega=1$ の場合、減衰量が -0498dB 、位相が -49.3deg ,

$\omega=2$ では減衰量が 42dB 、位相が -52.7deg となる結果が得られている。



4. HPF シミュレータ

演算処理は LPF の場合と異なりますが (LPF⇒HPF 変換)、操作手順は LPF と全く同じですので、詳細は省きます。ここでは設定部の説明のみを載せます。

アクティブHPFフィルタシミュレータ (演算部) : 2~9次まで

規格化容量										
C1	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	
1	0.1791986	0.106444	1.626281	0.1520	2.9771	0.099206	7.955449	0.034453	29.32551	定数表または任意の数値を挿入

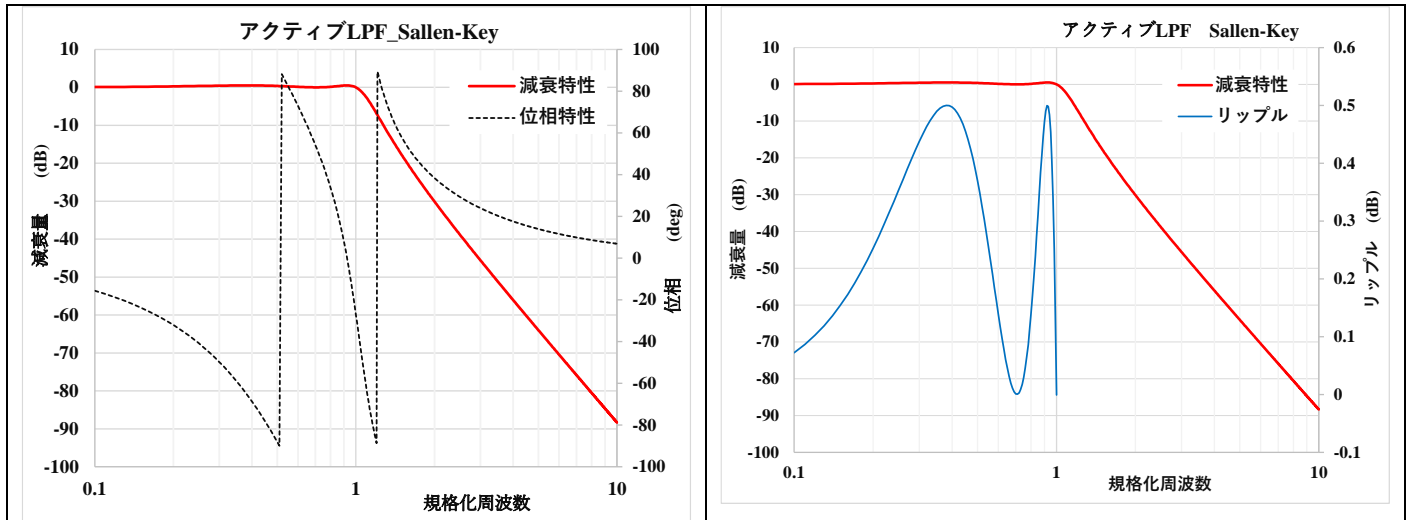
実回路設計定数 (使用する周波数と規格容量を入力する)

周波数 (kHz)	規格化容量 (μF)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)	R4 (kΩ)	R5 (kΩ)	R6 (kΩ)	R7 (kΩ)	R8 (kΩ)	R9 (kΩ)
0.3	0.01	9.5067823	5.647036	86.27687	8.063051	157.9388	5.26306	422.0497	1.827791	1555.767

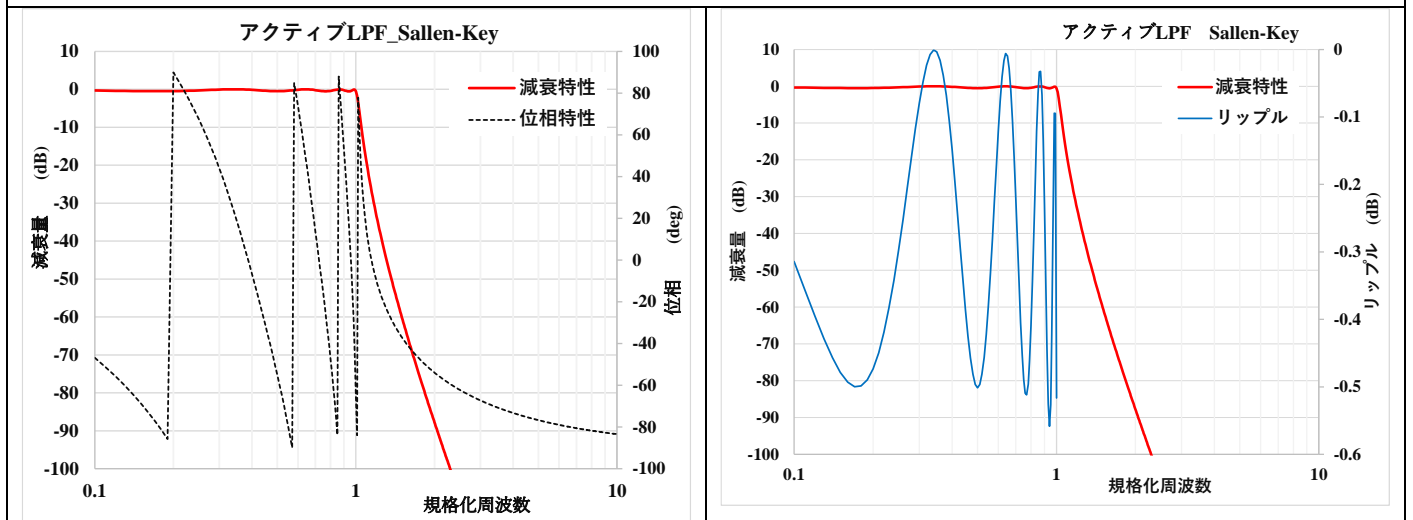
9次.05dB リップル：チェビシェフ HPF の設定値とその応答特性

得られた作図、他の例を紹介します。

LPF の例

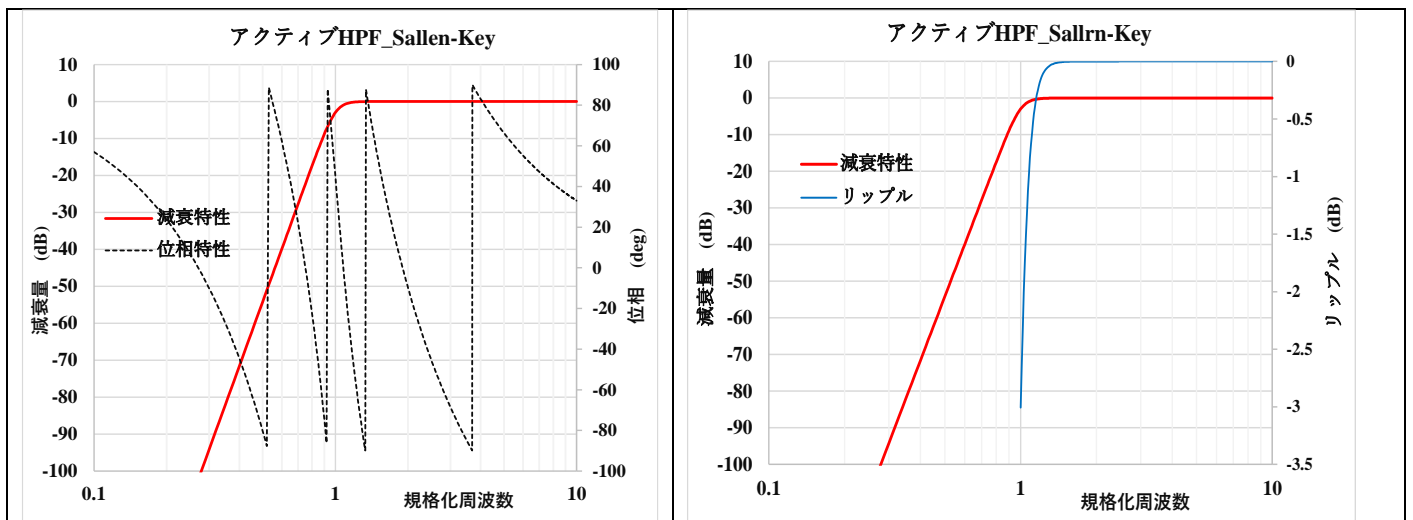


0.5dB リップル 4次チェビシェフ LPF 減衰、位相、リップル特性

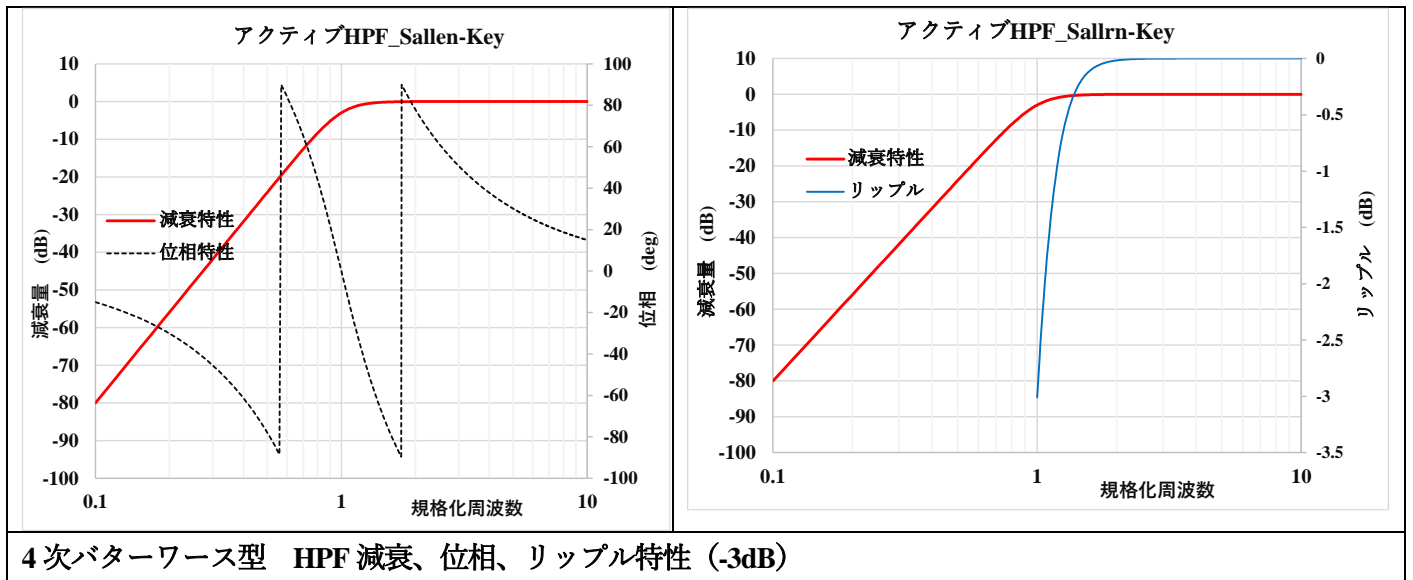


0.5dB リップル 9次チェビシェフ LPF 減衰、位相、リップル特性

HPF の例



9次バターワース型 HPF 減衰、位相、リップル特性(-3dB)



以上