

1. 経緯

これまでは LC 素子などの集中回路で構成されたフィルタを分布定数フィルタに置き換える手法を検討してきた。一般的に分布定数回路は**変定数で周期性**（4 倍の電気角または周波数毎）が有り、集中回路の設計理論はそのまま置き換えることは困難である。単純に置き換えた時はズレが生じる。高次のフィルタになると調整が難しくなるため、集中回路 LC 素子を分布定数回路に置き換える場合の調整法を検討し、実用範囲内で目的のフィルタ特性を得る情報を提供する。

フィルタ・タイプは実用的な減衰量を得る見地から、今回は 3 次、5 次と 7 次に限定する。

今回、正確に合わせる手順を見出しました。

留意する点は

- i. 周波数の上限は通過帯域の 2.2 倍程度
- ii. 線路インピーダンスのみの調整で出来るだけ合わせこむ。通過周波数が若干ずれる場合は、電気角（線路長）を一括して微調整する。今回はこの 2 点に絞って必要とする値を提供します。

2. 設計の手法

集中定数の LC 値を分布定数（線路特性インピーダンスと電気角）に置き換える。

返還の計算は以下の手法で行う。

集中回路の定数 (L, C) を分布定数に変換するには
それぞれの定数を線路インピーダンスと電気角に変換する。

$$L_n = Z_n \tan \theta_n \quad \Rightarrow \quad \theta_n = \frac{\pi}{2} \tan^{-1} \left(\frac{L_n}{Z_n} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$C_m = Z_m \frac{1}{\tan \theta_m} \quad \Rightarrow \quad \theta_m = \frac{\pi}{2} \tan^{-1} \left(\frac{1}{C_m Z_m} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

電気角 $\theta = \frac{\pi}{2} (90deg)$ となる電気長を $\frac{\lambda}{4}$ と定義する。

物理寸法や周波数特性などを決める場合は、これを基準にする

実際の置き換えはラインの実現性を考慮して：線路インピーダンスは 0.7~3 程度に範囲（35Ω~150Ω）で任淫靡設定する。 LC 集中定数回路とのズレは

- i. 最初は**電気角を固定**とし、線路インピーダンスの調整を行い、リップルや減衰カーブの**形状**のみを合わせ込む。
- ii. 素子の中央部を中心とし、**左右対称となるよう**インピーダンスを調整する。これが重要！
- iii. 通過帯の電気角のズレを加減し（2~3%）、電気角=1（ $\pi/2$ ）に合わせ込むことで、ほぼ完璧に調整できる。

以下に分布定数チェビシェフ LPF、さらに連立チェビシェフ（楕円関数、カウエル）*の変換を行う。

なお設定の条件としてはリップル（リターンロス、）、通過周波数をパラメータとして広範囲のデータを採取した。

*：こちらは若干問題があるため、今回は記載しません。後日報告予定

3 シミュレータの概要

各フィルタの構成は4部構成で“分布定数変換処理”、“設定確認部”、“演算処理部”、“加工グラフ”と“チューニング補助”から構成されています。

2-1. 変換部の構成

LPF集中定数変換					チェビシェフLPF集中定数表_Ripple毎						
Pipple	RL(dB)	L1	C2	L3	Pipple	LPF	L1	C2	L3	VSWR	RL(dB)
0.2dB	10.56	1.2280	1.1524	1.2280	0.01dB	3	0.6291	0.9701	0.6291	1.10	26.38
		↓	↓	↓	0.02dB	3	0.7227	1.0386	0.7227	1.15	23.38
		Z1	Z3	Z4	0.0436dB	3	0.8797	1.1131	0.8797	1.22	20.00
		3	0.7	3	0.05dB	3	0.8797	1.1131	0.8797	1.36	16.43
LPF分布定数変換		θ1	θ3	θ4	0.1dB	3	0.7227	1.0386	0.7227	1.15	13.47
		0.2473	0.4321	0.2473	0.2dB	3	1.2280	1.1524	1.2280	1.84	10.56
Zの微調	1.0294	0.2546	0.4448	0.2546	0.5dB	3	1.5984	1.0976	1.5898	2.66	6.87
電気角微調	1.02	0.2523	0.4408	0.2523							

Fig. 分布定数3次LPF

Fig. 3次LPF

集中定数の値（L1,C2, L3）を入力すると、自動的に等価変換が行われます。リップルやカットオフ周波数を望みの特性に知被けるよう、インピーダンスと電気長を微調出来るようにしてあります。また調整するLC値と電気長θは自由に設定できますので、インピーダンスや電気角のバラツキによるフィルタ特性変化を解析できるように作成してあります。

3-2. 設定部の構成

3要素分布定数 LPFシミュレータ						ポイント減衰量(dB)	
(Z1~Z3、θ1~θ3は任意に入力可能)						Ω=1.0	Ω=1.4
Zx	Z1	Z2	Z3	RI	0dB 基準	Ω=1.5	Ω=1.6
1	3	0.792	3	1	0	-0.2004	-6.471
0.2dB	θ1	θ3	θ4				
1.0294	0.2546	0.4448	0.2546	λ/4=π/2	1.571	-9.036	-24.684

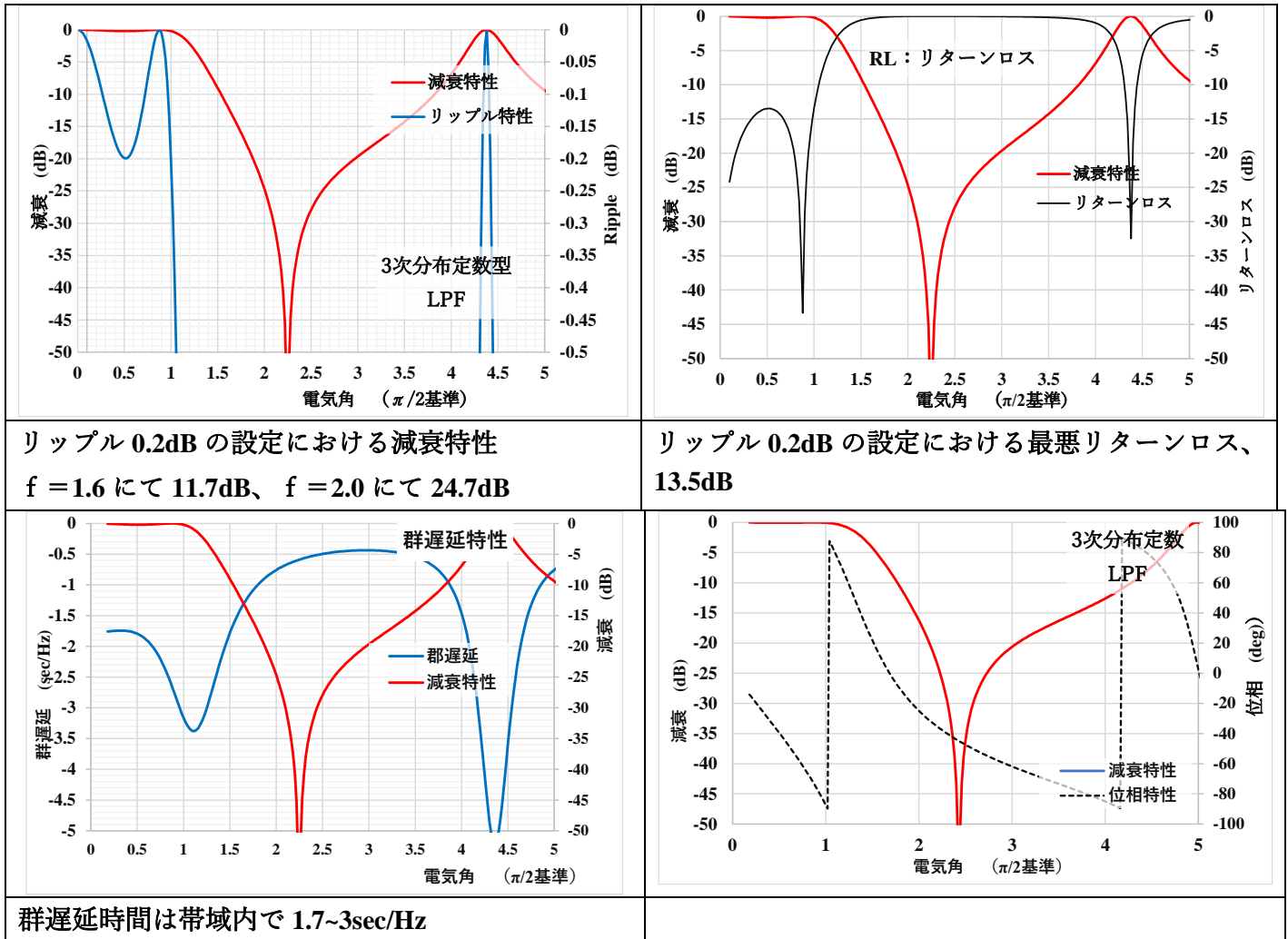
変換処理部の設定を見やすくまとめてあります。変換部で処理したインピーダンスと電気角を入力し、リップルや通過周波数を調整します。また規格化周波数（単位電気長：π/2）を基準とした周波数に対応した減衰量を表示しています。電気角θ=1はそのまま集中定数の規格化周波数1に相当します。

3-3. 演算処理分部の構成

3次集中定数LPFを3要素分布定数LPFに変換したときの演算を行っています。計算は2行2列の複素マトリックスの掛け算を300ステップ以上行っており、処理速度の時間の大半を占めています。このシートは保護されており、いじれません。周波数特性の細かい読み取りにのみ利用します。

3-4. 加工グラフ部

フィルタ特性の基本となるグラフをまとめて配置してあります。こちらはタイトル、スケールなど自由に加工できますので、報告書、プレゼンテーション資料の作成に使います。



4. 変換の数学的手法

- i. 回路素子または分布線路の一部の 4 端子マトリックス(ABCD)を決定する
- ii. 必要な段数のマトリックスを縦続接続する。
- iii. 負荷インピーダンスを含んだ 4 端子マトリックスを計算する。
- iv. 最終 4 端子マトリックスを S マトリックスに変換する
- v. 各マトリックス演算を Excel に落とし込む

図で表すと以下の様になっています。 まず LC 組み合わせの小ブロックを縦続接続して、縦続接続するごとにマトリックス掛け算を行う。掛け算を繰り返すと、各マトリックスにおける計算結果が得られ、最終伝達マトリックスから求められる。

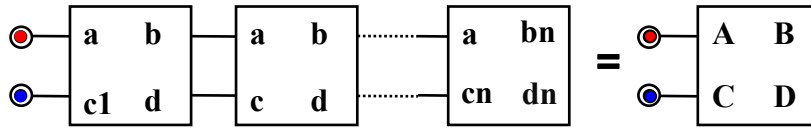


Fig 伝達 (ABCD) パラメータ変換

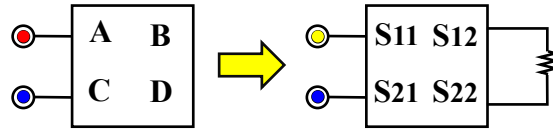


Fig. ABCDパラメータ Sパラメータ変換

最終伝達マトリックス (ABCD) を使って S パラメータに変換すると

伝達 (減衰) 特性は $S_{21} = \frac{2Z_l}{\Delta}$ (3)

反射特性は $S_{11} = \frac{A \cdot Z_l + B - C \cdot Z_{in} \cdot Z_l - D \cdot Z_{in}}{\Delta}$ (4)

ただし $\Delta = A \cdot Z_l + B + C \cdot Z_{in} \cdot Z_l + D \cdot Z_{in}$ (5)

位相は (3) より $\varphi = \tan^{-1} \left(-\frac{Im(S_{21})}{Re(S_{21})} \right)$ (6)

群遅延は (6) より $\tau = \frac{d\varphi}{d\omega}$ (7)

シミュレーションの例を示します。

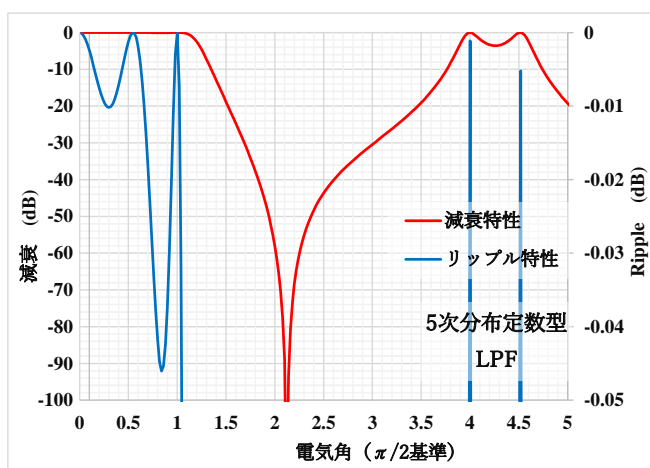
5. 参考 チューニングの前と後の比較

5-1. 5次分布型チェビシェフフィルタの例を示します。

Zx	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	RI	0dB 基準
1	3	0.7	3	0.7	3	1	0
	01	03	04	06	07		
	0.157221	0.47121	0.308145	0.47121	0.157221		

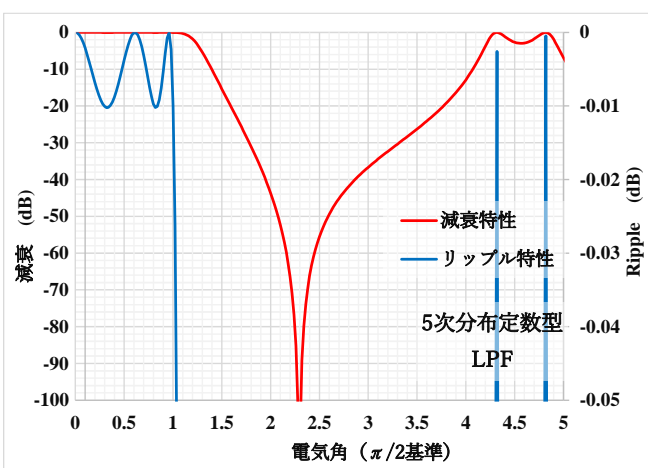
Zx	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	RI	0dB 基準
1	2.79	0.6572	3.193	0.657	2.79	1	0
Ripple	01	03	04	06	07		
0.01dB	0.158889	0.43614	0.294109	0.43614	0.158889		

0.01dB リップル VSWR:1.1 直接変換直後



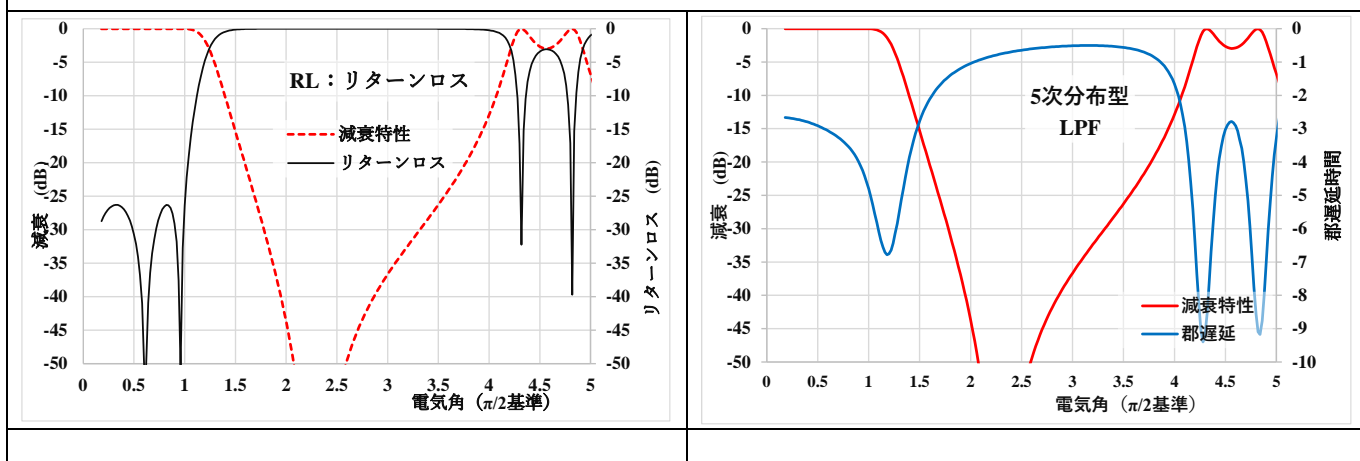
リップルのピークは揃っているがボトムが極端に異なる。カットオフ周波数が低い方へズレている。

0.01dB チューニング後の特性



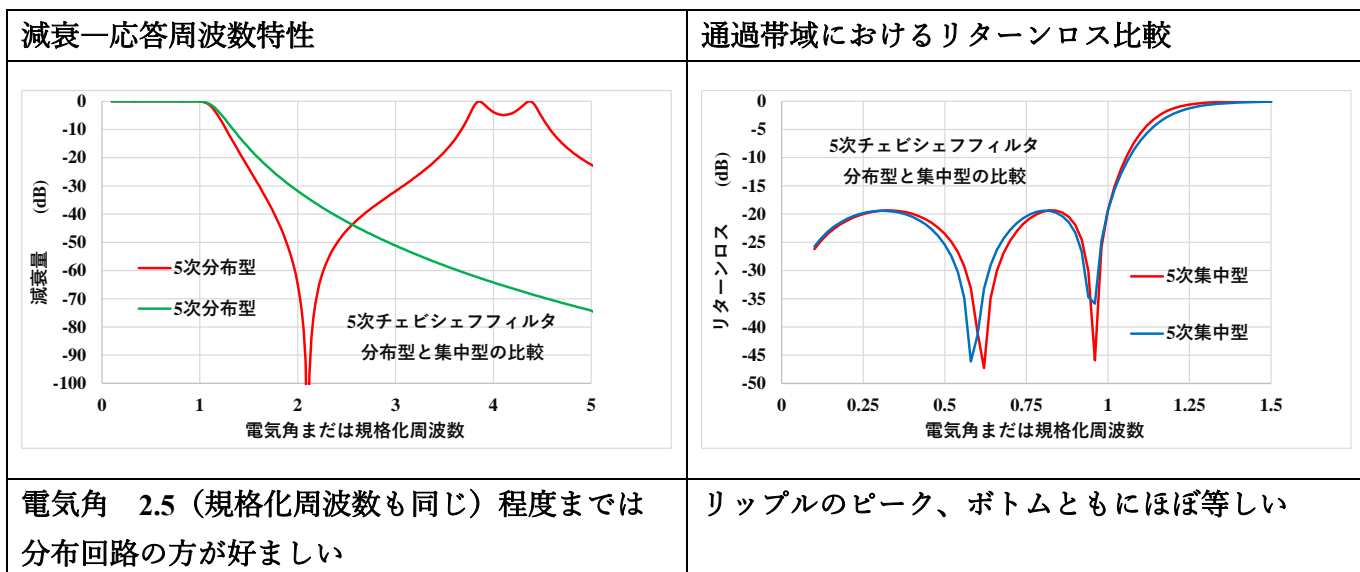
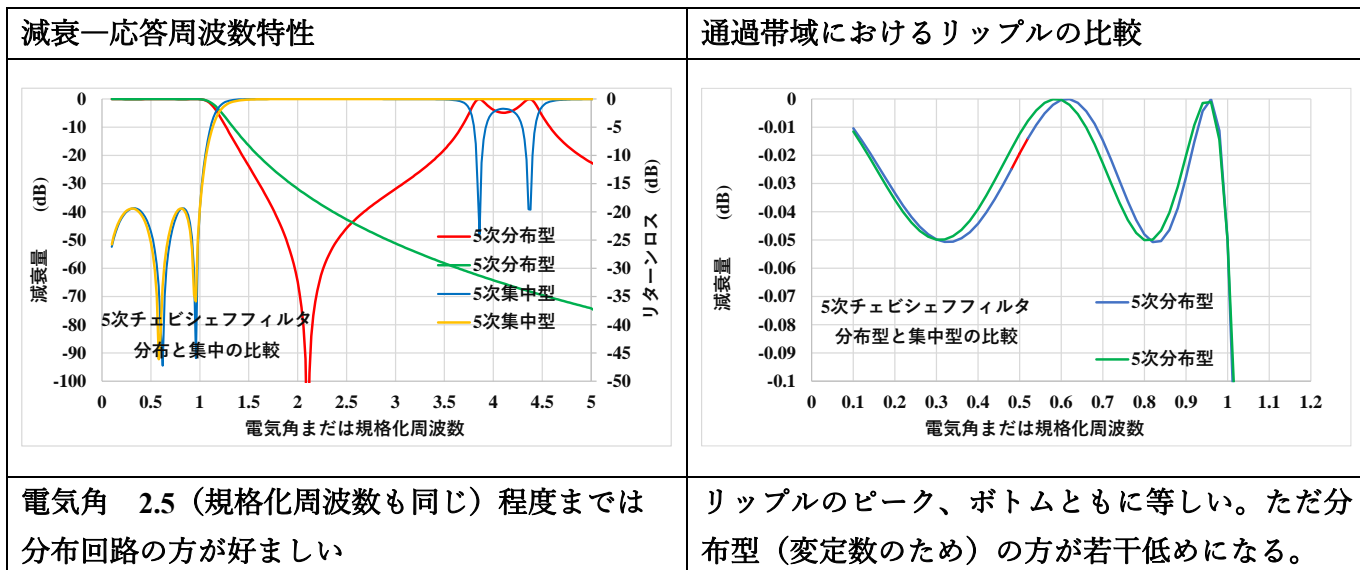
リップルを±0.01dB に合わせこみ、カットオフ周波数を高い方へ調整した。

0.01dB チューニング後の特性

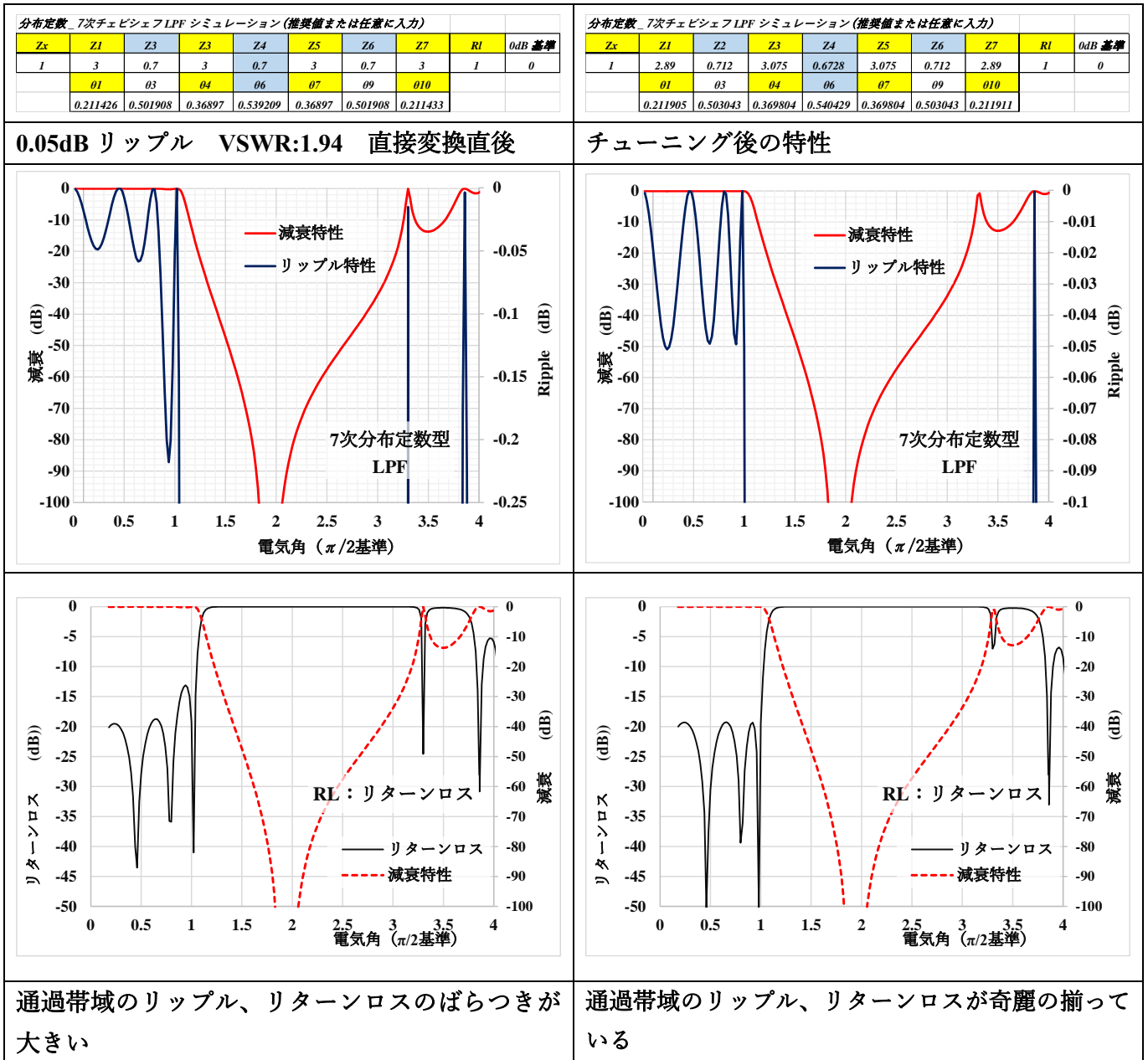


5-2. 分布回路、集中回路との比較 (5次)

比較条件: リップル 0.05dB (RL ; :19.4dB VSWR:1.24)



6.. 7次分布型チェビシェフフィルタの例



8. 集中回路⇒分布回路変換値 (精密)

3 次の巢招致

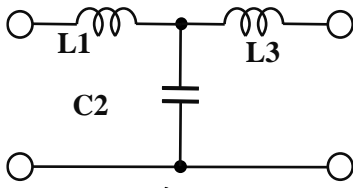


Fig. 3次LPF

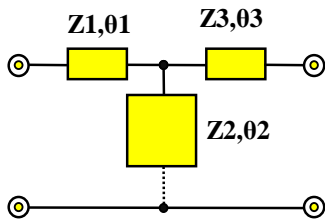


Fig. 分布定数3次LPF
低インピーダンス

3愛分布定数 LPFシミュレータ (Best match)

Z_x	Z_1	Z_2	Z_3	R_1	0dB 基準
1	2.88	0.79	2.88	1	0
Ripple	01	02	03		
0.02dB	0.150577	0.40043	0.150577		

ポイント減衰量(dB)

$\Omega=1.0$	$\Omega=1.4$
-0.0200	-1.255
$\Omega=1.6$	$\Omega=2.0$
-3.554	-12.083

3愛分布定数 LPFシミュレータ

Z_x	Z_1	Z_2	Z_3	R_1	0dB 基準
1	3	0.746	3	1	0
0.05dB	01	0.6	03		
	0.177493	0.411909	0.177493		

ポイント減衰量(dB)

$\Omega=1.0$	$\Omega=1.4$
-0.0500	-2.605
$\Omega=1.6$	$\Omega=2.0$
-6.176	-16.292

3愛分布定数 LPFシミュレータ

Z_x	Z_1	Z_2	Z_3	R_1	0dB 基準
1	3	0.76	3	1	0
0.1dB	01	03	04		
	0.211572	0.429862	0.211572		

ポイント減衰量(dB)

$\Omega=1.0$	$\Omega=1.4$
-0.100	-4.328
$\Omega=1.6$	$\Omega=2.0$
-8.893	-20.516

3愛分布定数 LPFシミュレータ

Z_x	Z_1	Z_2	Z_3	R_1	0dB 基準
1	3	0.792	3	1	0
0.2dB	01	03	04		
	0.25461	0.444841	0.25461		

ポイント減衰量(dB)

$\Omega=1.0$	$\Omega=1.4$
-0.200	-6.471
$\Omega=1.5$	$\Omega=1.6$
-9.036	-24.684

3愛分布定数 LPFシミュレータ

Z_x	Z_1	Z_2	Z_3	R_1	0dB 基準
1	3	0.883	3	1	0
0.5dB	01	03	04		
	0.341068	0.456435	0.339515		

ポイント減衰量(dB)

$\Omega=1.0$	$\Omega=1.4$
-0.500	-9.609
$\Omega=1.6$	$\Omega=2.0$
-15.186	-29.032

5 次の巢招致

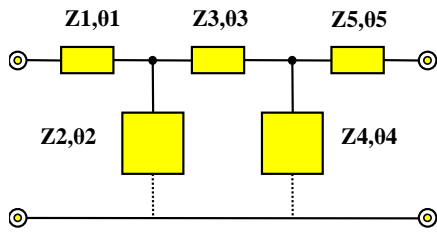
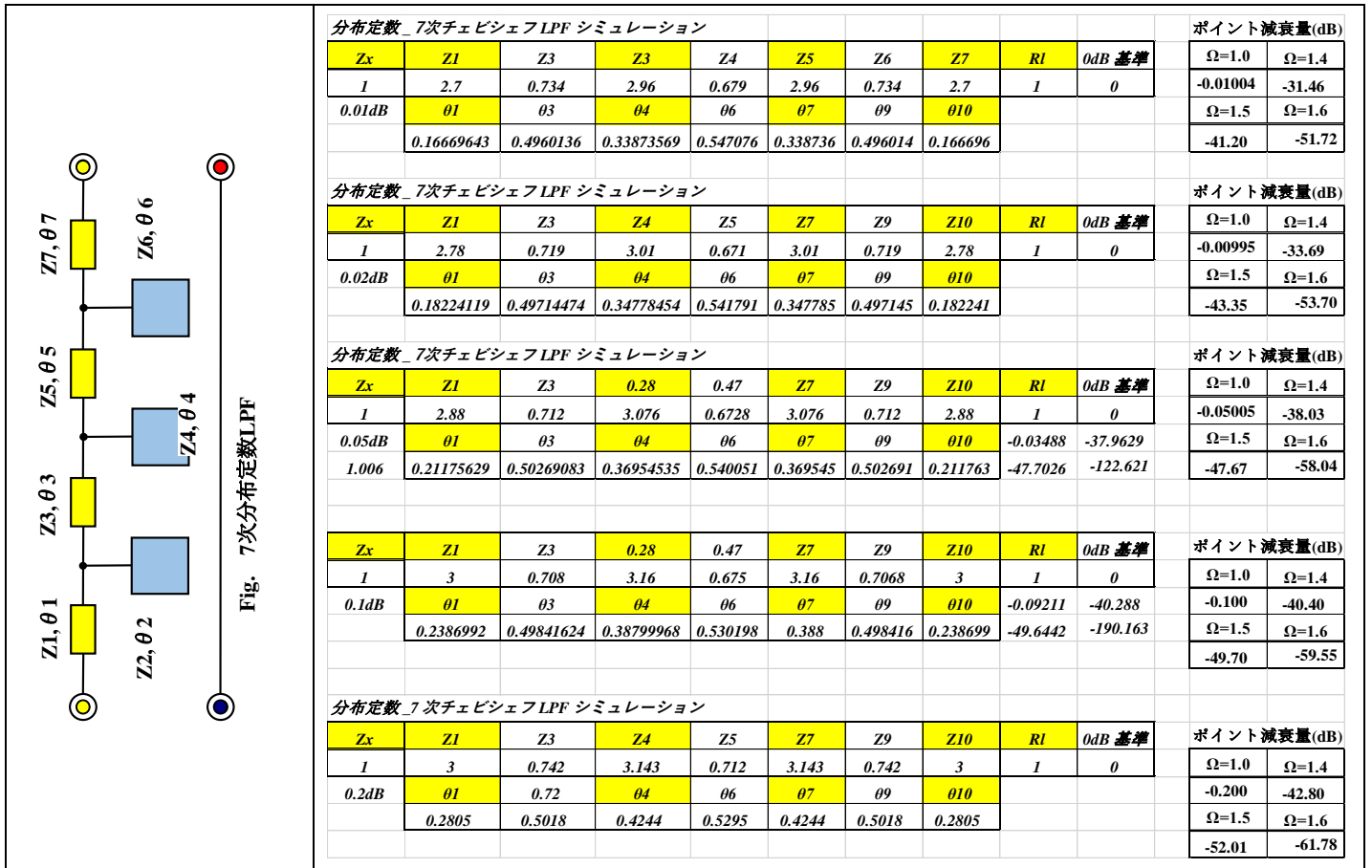


Fig. 5次LPF

5次分布定数フィルタ 推奨値								ポイント減衰量 (dB)	
Zx	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Rl	0dB 基準	$\Omega=1.0$	$\Omega=1.4$
1	2.79	0.6572	3.193	0.657	2.79	1	0	-0.010	-10.19
Ripple	01	03	04	06	07			$\Omega=1.5$	$\Omega=1.6$
0.01dB	0.158889	0.43614	0.294109	0.43614	0.158889			-15.33	-20.46
分布定数 5次チェビシェフLPF シミュレーション								ポイント減衰量 (dB)	
Zx	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Rl	0dB 基準	$\Omega=1.0$	$\Omega=1.4$
1	2.91	0.69	3.142	0.69	2.9	1	0	-0.020	-13.82
0.02dB	01	03	04	06	07			$\Omega=1.5$	$\Omega=1.6$
	0.169508	0.465288	0.313765	0.465288	0.169508			-19.48	-25.15
ポイント減衰量 (dB)								ポイント減衰量 (dB)	
Zx	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Rl	0dB 基準	$\Omega=1.0$	$\Omega=1.4$
1	2.94	0.682	3.174	0.682	2.95	1	0	-0.0437	-17.16
0.0436dB	01	03	04	06	07			$\Omega=1.5$	$\Omega=1.6$
20dB	0.197213	0.470184	0.335854	0.470184	0.197213			-22.92	-28.67
ポイント減衰量 (dB)								ポイント減衰量 (dB)	
Zx	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Rl	0dB 基準	$\Omega=1.0$	$\Omega=1.4$
1	2.98	0.69	3.172	0.69	2.98	1	0	-0.050	-17.92
0.05dB	01	03	04	06	07			$\Omega=1.5$	$\Omega=1.6$
	0.199487	0.475605	0.339726	0.475605	0.199487			-23.77	-29.64
ポイント減衰量 (dB)								ポイント減衰量 (dB)	
Zx	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Rl	0dB 基準	$\Omega=1.0$	$\Omega=1.4$
1	3.02	0.708	3.178	0.708	3.02	1	0	-0.100	-21.02
0.1dB	01	03	04	06	07			$\Omega=1.5$	$\Omega=1.6$
	0.230683	0.483383	0.367904	0.483383	0.230683			-26.96	-32.96
ポイント減衰量 (dB)								ポイント減衰量 (dB)	
Zx	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Rl	0dB 基準	$\Omega=1.0$	$\Omega=1.4$
1	3.09	0.72	3.24	0.72	3.09	1	0	-0.200	-23.45
0.2dB	01	02	03	04	05			$\Omega=1.5$	$\Omega=1.6$
13.4dB	0.267442	0.479322	0.398371	0.479322	0.267442			-29.25	-35.05

7 次 の 巢 招 致



以上