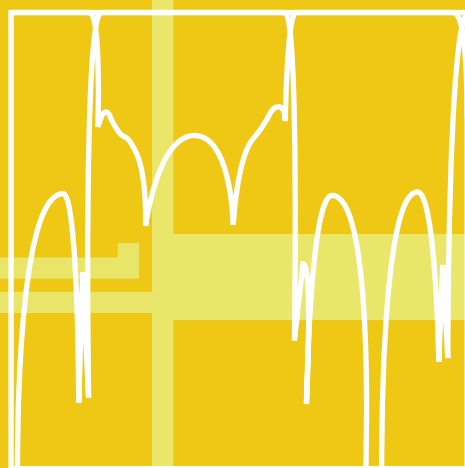


# 実用マイクロ波フィルタの 基礎と設計

工学博士 小西良弘



ケイラボ出版

## 概 要

RF フィルターは電波応用の分野で古くから広く用いられ、その図書も回路合成及び回路解析の立場から、また構造及び構成の立場から種々出版されている。そしてフィルターには第 1 章で述べるように電磁波回路の他、弾性波や磁気波などを用いたものが広く用いられている。

さて、最近はこちらフィルターも新しい材料を用いた小形フィルターや、通信領域の拡大と共に広帯域フィルターの用途も増え、種々研究開発がなされている。

そこで本書では、①従来知られているフィルターの設計原理に加え、最近の進歩した計算機でより精度よく求める際、それに必要な初期値を得るための新しい筆者の方法、例えば BPF を外部  $Q$  と共振器間の結合量とで簡単に得る方法を述べ、これらに基いて要求される特性に対する設計値を表にまとめた。②広帯域 BPF を得る方法の厳密な回路構成を結合分布線路を用いて行う方法を新しく提案している。また、これらに必要な結合線路を簡単に誘電体基板上に縦形平面回路 (VIP) を用いた例も示している。③フィルター応用回路として分波・合成器や、更にそれに直交モード分離器も併用したシステムを記述した。④また LPF, HPF から BPF, BRFB を構成する場合、インバータを用いた簡単な近似的方法のみならず、古くから行われている種々の厳密な等価回路変換も附録に紹介すると共に、それを用いた回路合成例を本文に示し、数値計算用の公式も誘導してプログラムを組み立てることができるようにまとめた。

以上が本書の特徴であり、これを基盤にしてより多くの展開ができるように、できるだけ原理的記述も行った。従って本書は、原理が把握でき、同時に設計にすぐ役立つことをねらいとして結果に重点を本文で述べた。そしてより細部にわたるが重要なところは付録に述べた。

さて、上述の主旨に沿って第 1 章ではフィルターの種類を述べ、本書で述べる電磁波回路フィルターの位置づけを明確にするとともに、フィルターの説明の理解に必要な基本事項を述べた。また、LPF や HPF の位相特性を利用し、任意の位相をこれらで実現する理想的概念と近似式を BODE の理論とフィルタ理論を用いて導いた。これを用いて支えられた位相角をもつ分布定数線路を集中定数形 LPF や HPF で置き換える設計法と設計例を述べた。

第 2 章では集中定数形フィルターを、第 3 章では分布定数形を述べた。ここでは分布定数の等価回路変換を用いた種々のフィルタ構成間の関連を流れ図で示すと共に、これを拡張して新しい回路構成の工夫の仕方を述べた。また Kuroda, Kuroda-Lewin の変換を用いて種々の楕円関数形 BRFB の合成例の公式を示した。また良く知られているインバータ変換による回路構成、実際に用いる分布定数形の回路構成及び集中定数形回路構成の比帯域幅の違いの原理を示し、その公式も導いた。

また、第 4 章ではフィルターの応用回路として分波器や直交偏波分離回路を述べた。

# 目次

<b>第 1 章 概論</b>	<b>1</b>
1.1 フィルターの種類	1
1.2 フィルターの種類と応用例	2
1.2.1 低域通過フィルタ	3
1.2.2 高域通過フィルタ	3
1.2.3 帯域通過フィルタ	4
1.2.4 帯域阻止フィルタ	4
1.3 フィルターの回路構成	5
1.3.1 はしご形回路	5
(イ) LPF の構成	5
(ロ) HPF の構成	6
(ハ) BPF の構成	6
(ニ) BRFB の構成	6
1.3.2 格子形回路	7
1.3.3 ブリッジ T 形回路	8
1.4 フィルターの伝送特性の表現	8
1.4.1 2 開孔回路の S パラメータ表示とフィルタの特性表示	8
1.4.2 2 開孔回路の減衰特性と位相特性との関係及びフィルタの遅延特性	10
1.4.3 伝送路の位相特性を集中定数形 LPF または HPF で近似する方法と設計法	13
1.4.4 3dB 方向性結合器を用いた移相回路	14
1.4.5 BPF や BRFB に必要な共振器とその Q 値及びフィルタ特性との関係	15
(1) 共振系の Q 値	15
(2) 種々の共振系とそれらの無負荷 Q 値	16
(3) 共振系の Q 値が BPF 及び BRFB に及ぼす影響	16
参考文献	21
<b>第 2 章 集中定数素子を用いたフィルターの構成</b>	<b>25</b>

<b>2.1</b>	<b>LPF</b>	<b>25</b>
2.1.1	バターワース・フィルタ (最大平坦特性) . . . . .	26
2.1.2	チェビシェフ・フィルタ . . . . .	28
2.1.3	ベッセル・トムソン・LPF . . . . .	29
2.1.4	等リップルエラーをもつ直線位相フィルタ . . . . .	31
2.1.5	楕円関数フィルタ . . . . .	32
2.1.6	回路構成と定数 . . . . .	34
	(1) バターワース, チェビシェフ, ベッセル・トムソン, 等リップル直線位相特性フィルタの構成 . . . . .	34
	(2) 楕円関数フィルタの構成 . . . . .	37
<b>2.2</b>	<b>HPF, BPF 及び BR</b>	<b>41</b>
2.2.1	周波数変換により HPF, BPF 及び BR を得る方法 . . . . .	41
2.2.2	$\pi/2$ 線路で並列共振回路を線路に並列に接続した BPF . . . . .	43
	(1) $\pi/2$ 線路を用いると直列素子と並列素子を置き換えることができる . . . . .	43
	(2) $\pi/2$ 線路で並列共振回路を接続した構成 . . . . .	45
2.2.3	隣接共振回路が電気または磁気結合した BPF . . . . .	46
2.2.4	$\pi/2$ 線路で直列共振回路を線路に並列に接続した BR . . . . .	47
	<b>参考文献</b>	<b>49</b>
<b>第 3 章</b>	<b>分布定数回路を用いたフィルタの構成</b>	<b>53</b>
<b>3.1</b>	<b>集中定数回路を分布定数線路で実現するための必要な予備知識</b>	<b>53</b>
3.1.1	集中定数素子を波長に比べて短い長さ $l$ の分布定数線路で置き換える方法 . . . . .	53
3.1.2	並列共振及び直列共振回路は, 先端短絡又は開放の分布定数線路で置き換えうる。 . . . .	56
	(1) 並列共振回路 . . . . .	56
	(2) 直列共振回路 . . . . .	56
3.1.3	並列共振回路と直列共振回路の縦続接続は結合線路で実現できる。 . . . .	56
<b>3.2</b>	<b>LPF と HPF の構成と設計</b>	<b>58</b>
<b>3.3</b>	<b>BPF の構成と設計</b>	<b>59</b>
3.3.1	回路構成と設計の概念 . . . . .	59
	(a) 集中定数回路構成から等価回路変換による方法 . . . . .	59
	(b) 外部 Q 値, $Q_e$ と隣接共振器間の結合係数 $k_{i,i+1}$ ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) による設計 . . . . .	60
	(c) $Q_e$ と $k_{ij}$ の測定法 . . . . .	63
3.3.2	種々の構成例と具体例題 . . . . .	66
	(1) $\lambda/4$ 線路を介して片側短絡 $\lambda/4$ 共振回路を主線路に並列に接続した構成及びその変形による $n$ 段 BPF の設計 . . . . .	66
	(2) 結合線路を用いた BPF の設計 . . . . .	80

	(3) 狭帯域近似による分布定数線路 BPF . . . . .	97
	(4) 誘電体共振器を用いた BPF . . . . .	109
	(5) その他の構造—ヘリカル共振器 BPF, 導波管 BPF 及び E 面回路 (立体平面回路) BPF . . . . .	118
3.3.3	帯域外の周波数でトラップをつくる方法 . . . . .	125
	(1) 低損失高誘電率材料の平行 2 導体でできる 2 個の共振器 (コムライン) をキャパシティまたはインダクタで結合した BPF . . . . .	125
	(2) 3 段 BPF の入出力間にリアクタンスを挿入する方法 (マルチパスによる方法)	125
	(3) 2 段 BPF の通過帯域より低い周波数と高い周波数に 1 個ずつトラップを入れる方法 (マルチパスによる方法) . . . . .	127
	(4) 多段 BPF にマルチパス結合を行って通過帯域より高い周波数と低い周波数にトラップを入れる方法及び直線位相特性を得る方法 . . . . .	131
	(5) のトラップ回路を付加接続する方法 . . . . .	133
<b>3.4</b>	<b>BRF の構成と設計</b>	<b>137</b>
3.4.1	種々の構成 . . . . .	137
3.4.2	BRF の設計 . . . . .	141
	(1) 減衰域の中心周波数で減衰を無限大にし減衰帯域以外では Tchebycheff 特性の通過特性にするもの . . . . .	141
	(2) 楕円関数系 BRF . . . . .	144
	(3) 減衰域の中心周波数を少しずつずれて減衰帯域内を Tchebycheff 特性にする方法 . . . . .	156
<b>3.5</b>	<b>周波数特性が非対称な楕円関数フィルターと構成</b>	<b>157</b>
<b>3.6</b>	<b>共振器及びフィルタの小形化</b>	<b>161</b>
3.6.1	比誘電率 $\epsilon_r$ や比透磁率 $\mu_r$ の大きな材料を用いる方法 . . . . .	161
	(1) 高誘電率誘電体を含む TEM 共振器を用いる方法 . . . . .	161
	(2) 高誘電率誘電体共振器を用いる方法 . . . . .	161
3.6.2	分布定数線路を用いた共振器の小形化 . . . . .	161
	(1) 密集化 . . . . .	161
	(2) ステップインピーダンスにする方法 . . . . .	162
3.6.3	縮退形共振器を用いた小形化 . . . . .	163
3.6.4	その他の材料素子を用いる方法 . . . . .	166
	(1) 静磁モード共振器 . . . . .	166
	(2) 表面弾性波フィルタ . . . . .	166
	(3) 薄膜バルク弾性波共振器 . . . . .	166
<b>3.7</b>	<b>補注</b>	<b>168</b>

[補注 1] 等しい先端短絡 $\lambda/4$ 線路を $\lambda/4$ 線路で縦続接続した $n$ 段 Tchebycheff 梯子形 BPF の設計	168
[補注 2] 補注 1 を摂動法で解く方法とその具体例	171
[補注 3] 等しい先端開放 $\lambda/4$ インターディジタル結合線路を $\lambda/4$ 線路を介して縦続接続した $n$ 段 Tchebycheff BPF の設計	173
[補注 4] 共振器間の結合係数	174
参考文献	176
第 4 章 フィルターのシステム応用回路	181
4.1 分波器	181
4.1.1 LPF と HPF を用いる構成	181
4.1.2 $n$ 波分波合成回路	183
(1) 分波回路と BPF を用いる方法	183
(2) 入力開孔に接続される主線路から順次に BPF を介して分離する方法	184
(3) 分布結合線路を用いる方法	186
(4) サーキュレータ及び 3dB 方向性結合器を用いる方法	189
(5) 主線路に進行波形 BPF を縦続接続する方法	189
4.2 直交偏波及び周波数分離機能をもつ送受信システム	190
4.2.1 直交モード分離・合成器	190
4.2.2 直交偏波及び周波数分離機能をもつ送受信システム	192
参考文献	193
付録	197
[付録 1] 結合線路の等価回路	197
[付録 2] 種々の構造の外部 $Q$ , $Q_e$	206
[付録 3] 種々の構造の共振器間の結合と $k_{ij}$	208
[付録 4] マルチパス（クロスカップリング）を用いた BPF の設計例	213
(i) 直線位相 BPF の設計例	213
(ii) 6 段マルチパス BPF による楕円関数特性または直線位相フィルタの例	216
(iii) 通過帯域の低い所と高い所に 1 つずつトラップが入るマルチパス BPF の例	217
[付録 5] Kuroda の変換及び Kuroda-Levy の変換	219

[付録 6] 3dB 方向性結合器を用いた位相回路の遅延特性一例	221
[付録 7] 小形平面共振回路の種々の構造の考え方と試作測定値	222
参考文献	224
資料	227
遮蔽箱内の多層基板 TEM 及び準 TEM 線路定数例	227
資料 1 伝送線路の公式と特性	227
(i) ストリップ線路の特性インピーダンス $Z$ と減衰定数 $\alpha$ . . . . .	227
(ii) マイクロストリップ線路の特性インピーダンス $Z_0$ , 実効比透電率 $\epsilon_{r,eff}$ 及び $Q$ 値 . . . . .	228
資料 2 誘電体基板を用いた結合線路	230
(i) 偶モード及び奇モードの位相速度を等しくする方法 . . . . .	230
(ii) 基板上の結合マイクロストリップ線路の偶モードインピーダンスと奇モードインピーダンス . . . . .	235
(iii) その他の構造 (偶及び奇モードの位相速度は異なるが強い結合度を得る方法) . . . . .	242
参考文献	244