

方形導波管誘導性窓の等価回路に基づく解析 —1 段誘導性窓の点整合法およびモード整合法による計算—

平岡 隆晴* 許 瑞邦**

Analysis of Rectangular Waveguide Inductive Windows based on Equivalent Network —Calculation of Single Inductive Window by Point Matching Method and Mode Matching Method—

Takaharu HIRAOKA* Jui-Pang HSU**

1. 研究の目的

方形導波管誘導性窓は、導波管内に薄い金属板や誘電体板を挿入した構造で、複数個の窓を配置することで窓と窓の間の導波管が空洞共振器として機能する。共振器長や窓幅の寸法を適切に設定することにより、共振周波数や共振器間の結合が制御できるので、帯域通過フィルタなどの機能素子として用いられる。ここでは厚さのない無厚誘導性窓と金属板の装荷を考慮した有厚誘導性窓について等価回路に基づく計算を行った。点整合法およびモード点整合法に基づいた入出力特性を比較することで両手法のつながりや考慮モード数（サンプリング点数）による収束性について報告する。

2. 方形導波管 1 段誘導性窓

方形導波管の中に金属あるいは誘電体の薄い板を挿入すると、窓と呼ばれる開口部が絞られることにより、導波管中を伝搬する電磁波の一部には反射波が生じる。導波管中の電界 E と平行方向に開いた窓はインダクタンス成分を持つことから誘導性窓といい、一方電界 E と垂直方向の窓はキャパシタンス成分を有するので容量性窓という。誘導性窓や容量性窓を複数個配置することにより多重反射が生じ、反射波同士の振幅が打ち消される条件下では空洞共振器として動作する。空洞共振器の長さや誘導性窓の幅等の寸法を適切に設定することにより、共振周波数や共振器間の結合が制御できるので、図 1 に示す多段誘導性窓構造は帯域通過フィルタとして用いられる。

図 2(a) に示す無厚誘導性窓は金属の厚さ $t=0$ とした構造で、#1 と #2 の 2 領域の導波管となる。無厚誘導性窓は金属壁及び導波管 #1, #2 の接続部の各部分において適切なサンプリング点を取り、境界条件を満たすように入射波の関係を求める点整合法を用いて計算を行う。一方、図 2(b) に示す有厚誘導性窓は幅の広い導波管 #1, #3 と狭い導波管 #2 の 3 領域の導波管で構成される。2ヶ所ある不連続部はステップ型不連続といい、幅の異なる導波管の伝送モード間の結合を考慮したモード整合法を用いて計算を行う。

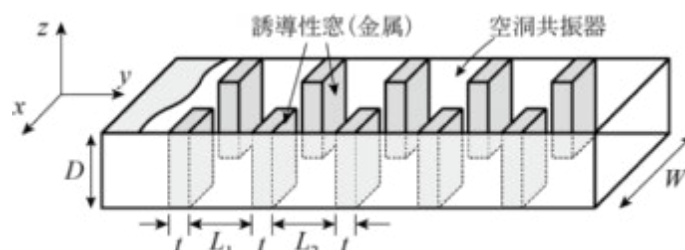


図 1 方形導波管窓付き共振器型フィルタ回路

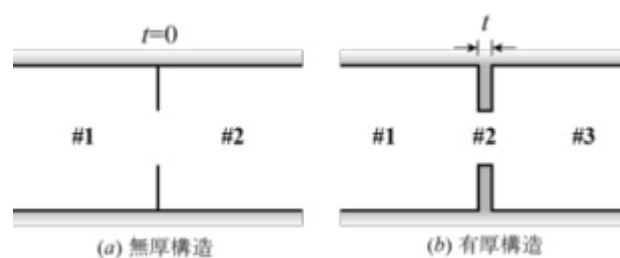


図 2 1 段誘導性窓の無厚及び有厚構造

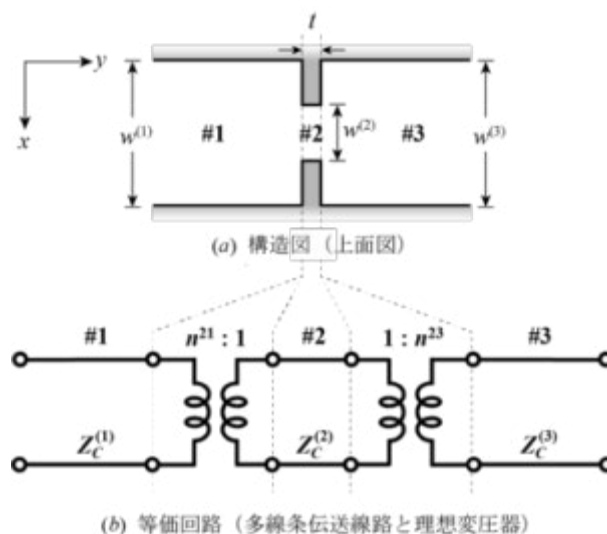


図 3 1 段有厚誘導性窓の構造と等価回路

*准教授 電気電子情報工学科 Associate Professor,
Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering
**客員研究員 工学研究所
Invited Researcher. Research Institute for Engineering

3. 点整合法とモード整合法

点整合法は誘導性窓における金属板や開口部でサンプリング点を定め、各点における境界条件（短絡境界あるいは連続境界）を満たすように入射波と反射波の関係から散乱行列を求める手法である。計算にはサンプリング点数と考慮モード数を一致させる必要があり、その計算精度はサンプリング点数に依存する。サンプリング点の取り方に柔軟性があるため、さまざまな不連続構造への適用範囲が広いのが特徴である。

モード整合法は幅広・幅狭導波管の伝送モードに対応した多線条伝送線路型の等価回路が図 3(b)で与えられたとき、不連続部の端子電圧および端子電流が導波管の固有関数から与えられる結合度によって関係づけられる方法である。端子電圧・電流および結合度の関係からインピーダンス行列が得られるので、そのインピーダンス行列を変換して散乱行列を得る。考慮する伝搬モード数を増やすと計算精度があがるので、厳密な解析が実行できるのが特徴である。

表 1 点整合法とモード整合法

	点整合法	モード整合法
関係式	入射波, 反射波	端子電圧, 端子電流
収束性	サンプリング点数	伝搬モード数
適性	適用範囲が広い	厳密な解析

4. 計算結果

方形導波管 1 段誘導性窓において、点整合法に基づく無厚構造とモード整合法に基づく有厚構造の周波数特性を図 4 に示す。モード整合法における誘導性窓の厚さを $t=0.001, 0.01, 0.1$ [mm] として計算した結果、厚さが薄くなるにしたがって点整合法の無厚 $t=0$ の結果とほぼ一致した。誘導性窓の厚さが十分に薄いとときの計算結果から、両手法の間にはつながりがあるといえる。

つづいて、誘導性窓 $t=1.0$ [mm] の有厚構造として同じ構造としたときの点整合法とモード整合法に基づく周波数特性を図 5 に示す。点整合法においては、モード整合法と同様に 2 不連続としたときの境界条件を満たすように計算を行った。同図の周波数範囲において両者は一致する傾向がみられるが、さらに $f=10$ [GHz] における S パラメータの収束性について検討を行った。モード整合法においてはモード数、点整合法においては不連続部のサンプリング点数を 500 次まで変化させたときの反射特性 S_{11} の収束性を図 6(a) に、また透過特性 S_{21} の収束性を図 6(b) に示す。モード数（サンプリング点数）を増加させるにつれて両者が一致する傾向がわかる。

5. むすび

方形導波管誘導性窓の基本構成要素である 1 誘導性窓について、不連続での境界条件を直接適用した点整合法とステップ型不連続と多線条伝送線路で表される等価回路に基づいたモード整合法の両手法により計算を行った。両手法の結果はモード数を考慮することにより一致する傾向が確認でき、誘導性窓における解析方法の妥当性を検証することができた。今後は多段構成の誘導性窓の解析を行い、帯域通過フィルタ設計への応用に取り組む予定である。

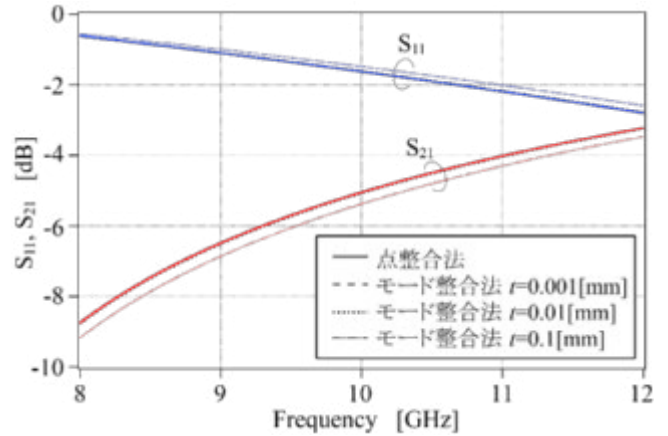


図 4 無厚および有厚構造 1 段誘導性窓の周波数特性

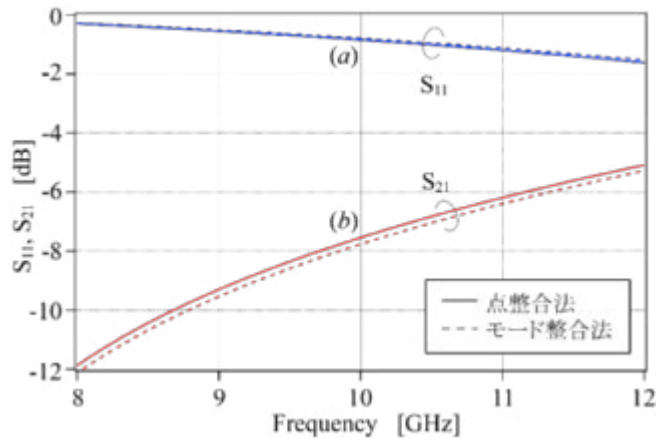


図 5 $t=1.0$ [mm] の有厚構造における点整合法及びモード整合法による周波数特性

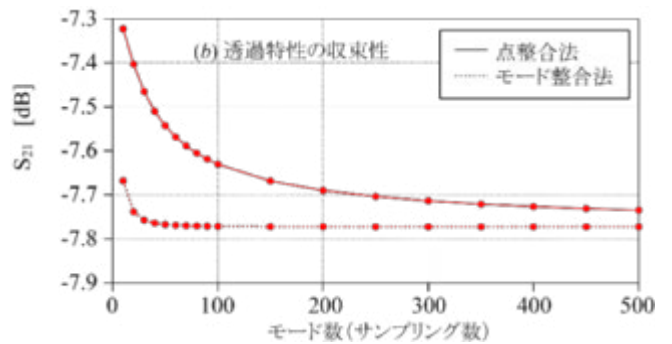
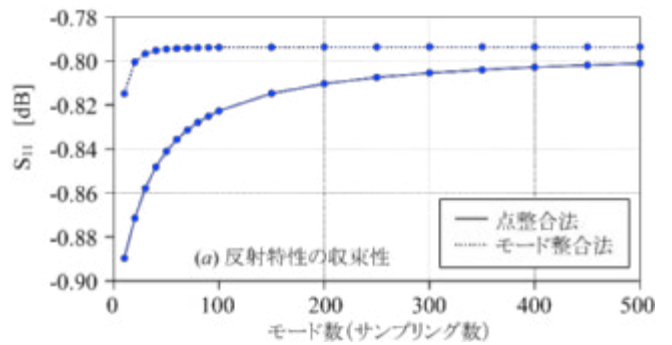


図 6 モード数に対する収束性@10GHz