

方形導波管金属ポスト回路の中心周波数の決定

今 井 弘*

Determination of Center Frequency of Metallic Post Circuit in Rectangular Waveguide

Hiroshi IMAI*

(Received April 12, 1985)

The purpose of this paper is to determine the center frequency of the metallic post resonant circuit in the rectangular waveguide. The circuit is constructed of two metallic posts which are mounted with some spacings in the rectangular waveguide. When the metallic post spacing of the resonator is equal to the element spacings of the equivalent circuit, the equations for the center frequency of these circuits are derived using the correction values of the metallic post spacings determined so far by the author.

The experimental values of the center frequency agree fairly well with the calculated ones with error less than 0.2%. Furthermore, a few theoretical and experimental investigations about the center frequency are presented. Comparisons between theoretical and experimental results show the validity of the proposed equations.

1. まえがき

筆者がこれまでに報告してきた多段形 pin ダイオード減衰器のようなマイクロ波デバイスは、方形導波管内 H 面に金属ポストを立て、そこにダイオードを装荷し、これらを数段ある間隔で接続して構成される^{(1)~(3)}。この導波管形の pin ダイオード減衰器は、ダイオードを装荷した金属ポストの中心から中心までをダイオード素子間隔として、設計中心周波数の管内 4 分の 3 波長で接続して構成されている。したがって、ダイオード素子間隔は主に金属ポストの幅によって等価的に短くなり、筆者が報告した直径 3 mm の金属ポストを用いた 3 段形 pin ダイオード減衰器の場合には、減衰器の中心周波数はその設計値より約 40 MHz 高くなる⁽³⁾。そこで、従来は素

子間隔を設計値よりある程度補正し、さらに 2 本の金属ポストの間に容量性の周波数微調用ポストを設けて、強制的にデバイスの中心周波数を設計値に一致させてきた⁽⁴⁾。

筆者は、ダイオードを装荷する金属ポストのポスト間隔の補正值を得るために、若干の損失を考慮した場合の 2 段形金属ポスト回路において種々検討し、次に述べる事項を報告してきた⁽⁵⁾。

第一には、等価回路により n 段形金属ポスト回路の入力インピーダンス、透過減衰量の一般式を求め、この一般式を基にして、2 段形金属ポスト回路の金属ポストが若干の損失を持つとした場合のポスト間隔の式を挿入損失最小の条件より求めた。この損失を考慮したポスト間隔の式は無損失と置くと、開放及び短絡アドミッタンスより求められている結果に一致している⁽⁶⁾。

*電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

第二には、直径 $d=2.0\sim 4.5$ mm まで 0.5 mm 毎の金属ポストにより 2 段形金属ポスト共振回路を構成し、実験的な検討を加えて、等価回路により求めた理論式の有効性を確認した。

第三には、得られた結果を基にして、金属ポスト回路の共振長の実験値と等価回路による計算値を比較検討し、金属ポストの等価幅、即ち、金属ポスト間隔の補正値を決定した。

第四には、金属ポスト回路と等価回路の共振長を等しいと置いた場合には、金属ポスト回路の金属ポスト間隔の補正値の波数及び中心周波数と等価回路による中心周波数との間に、ある関係が存在することを実験値を基にして示した。これにより、若干の損失を考慮した 2 段形金属ポスト回路の中心周波数が推定できることを示した。

本論文では、上記の実験的に得られた第四の金属ポスト回路と等価回路の中心周波数の関係について、理論的に詳しく検討し、実験値との比較を行った。即ち、金属ポスト回路と等価回路の共振長を等しいと置き、既に決定した金属ポスト間隔補正値を用い、金属ポスト回路の中心周波数と等価回路の中心周波数の間の関係式を導き出した。この導出した関係式を中心周波数実験値と比較検討し、関係式の有効性を検証した。その結果、本論文は金属ポストを用いたマイクロ波デバイスの中心周波数を金属ポスト間隔補正値を利用して決定する方法を明らかにしている。更に、上記の関係式の近似式を導き出して実験的検討も加え、既に報告した実験的検討のみから求めた第四の結果の妥当性を明らかにした。即ち、金属ポスト回路の金属ポスト間隔補正値の波数と中心周波数の積は、金属ポスト回路の中心周波数と等価回路の中心周波数の差に大略等しいことを理論的に求め、この近似式を利用しても金属ポストを用いたマイクロ波デバイスの中心周波数をあまり大きな誤差もなく求められることを示した。

2. 中心周波数の計算式^{(5),(7)}

金属ポスト回路のポスト間隔と等価回路の素子間隔を等しいと置いたときの両者の中心周波数の関係について

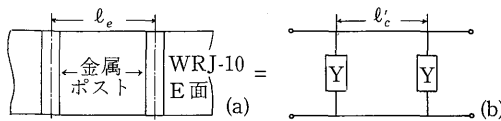


図-1 金属ポスト回路とその等価回路

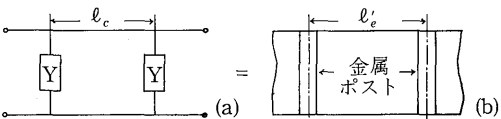


図-2 等価回路とその金属ポスト回路。

理論的に検討していく。

図 1-a に示した方形導波管形金属ポスト共振回路のポスト間隔（共振長）を l_e とし、図 1-b に示した同一の中心周波数を持つ図 1-a の等価回路の素子間隔（共振長）を l'_e とする。同様に、図 2-a に示した等価回路とこの等価回路に対する実際の金属ポスト回路の素子間隔とポスト間隔をそれぞれ l_e 、 l'_e とする。既に明らかにした金属ポスト間隔補正値 Δl を用いると、これらのポスト間隔、素子間隔、の間にはそれぞれ次の関係がある。

$$l_e = l'_e + \Delta l \quad (1)$$

$$l'_e = l_e + \Delta l \quad (2)$$

図 1-a、図 2-b の中心周波数をそれぞれ f_{e0} 、 f_{c0} とし、中心周波数の差を次のように、 ΔF で表わす。

$$\Delta F = f_{e0} - f_{c0} \quad (3)$$

次に、図 1-a、図 2-b の導波管形金属ポスト回路の中心周波数に対応する自由空間波長を λ_{e0} 、 λ_{c0} 、管内波長を λ_{eg} 、 λ_{cg} とすると、次の関係式が成立する。

$$1/\lambda_{e0}^2 = 1/\lambda_{eg}^2 + 1/\lambda_c^2 \quad (4)$$

$$1/\lambda_{c0}^2 = 1/\lambda_{cg}^2 + 1/\lambda_c^2 \quad (4')$$

(4)、(4') 式より λ_c を消去して、次の式が得られる。

$$(\lambda_{c0}^2 - \lambda_{e0}^2)/(\lambda_{c0}\lambda_{e0})^2 = 1/\lambda_{eg}^2 - 1/\lambda_{cg}^2 \quad (5)$$

それぞれの中心周波数と自由空間波長の間には次の関係式がある。

$$f_{e0}\lambda_{e0} = f_{c0}\lambda_{c0} \quad (6)$$

図 1-a、図 2-b の金属ポスト回路において、ポスト間隔は管内波長に比例するから、それぞれの両者の間に次の関係式が存在する。

$$\lambda_{cg}/\lambda_{eg} = l'_e/l_e \quad (7)$$

(2) 式を用いると、(7) 式は次のように表わせる。

$$\lambda_{cg}/\lambda_{eg} = (l_e + \Delta l)/l_e \quad (8)$$

ここで、金属ポスト回路と等価回路の中心周波数 f_{e0} 、 f_{c0} の関係を求めるために、図 1-a のポスト間隔 l_e と図 2-a の素子間隔 l'_e を等しいとして、

$$l_e = l'_e \quad (9)$$

と置く。この場合に、金属ポスト回路のポスト間隔 l_e は金属ポストの幅により等価的に短くなり、この回路の中心周波数 f_{e0} は等価回路の中心周波数 f_{c0} より高くなる。したがって、(3) 式で示した中心周波数の差は、 $\Delta F > 0$ になる。

(9) 式で示した条件式を (8) 式に適用すると、それぞれの金属ポスト回路の管内波長の関係は次の式によって表わせる。

$$\lambda_{cg}/\lambda_{eg} = (l_e + \Delta l)/l_e \quad (10)$$

又は、

$$\lambda_{cg}/\lambda_{eg} = (l_e + \Delta l)/l_e \quad (11)$$

(5)、(6) 式及び (10) 式を用いて、 $1 - (f_{e0}/f_{c0})^2$ を計算す

ると、次の結果が得られる。

$$f_{eo} = f_{co} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_{co}}{\lambda_{eg}} \right)^2 \left\{ \left(1 + \frac{\Delta l}{l_c} \right)^2 - 1 \right\}} \quad (12)$$

同様に、(5)、(6)式及び(11)式を用いて、 $1 - (f_{co}/f_{ec})^2$ を計算すると、次の結果が得られる。

$$f_{co} = f_{eo} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_{eo}}{\lambda_{eg}} \right)^2 \left\{ \frac{1}{(1 + \Delta l/l_e)^2} - 1 \right\}} \quad (13)$$

(12)、(13)式は、金属ポスト回路のポスト間隔 l_e と等価回路の素子間隔 l_c を等しいと置いた場合、それぞれの中心周波数 f_{eo} 、 f_{co} の関係を金属ポスト間隔補正值の Δl と波長で表わした式である。

(12)、(13)式について、少し検討してみる。まず、図2-aの等価回路の素子間隔 l_c を与えたとき、既に筆者により導き出されている次の(14)式により間接的に中心周波数 f_{co} が求められる。

$$l_c = \frac{\lambda_{cg}}{2} \left\{ n + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{2B}{B^2 + G^2 + 2G} \right) \right\}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (14)$$

この(14)式において、 B は金属ポストの正規化サセプタンスで、その値は既に良く知られている計算式⁽⁸⁾を用いて求める。又、 G は金属ポストの若干の損失を考慮したときの正規化コンダクタンスで、その値は金属ポスト共振回路の挿入損失測定値より求めた実験式⁽⁵⁾より求める。

(12)式は、素子間隔 l_e を与えたとき、(14)式により求まる等価回路の中心周波数 f_{co} と金属ポスト間隔補正值 Δl を用いて、ポスト間隔 l_e が素子間隔 l_c に等しい金属ポスト回路の中心周波数 f_{eo} を与える。即ち、等価回路の素子間隔に等しいポスト間隔の金属ポスト回路の中心周波数 f_{eo} が金属ポスト間隔補正值 Δl を用いて決定出来る。次に、(13)式では、ポスト間隔 l_e の金属ポスト回路の中心周波数 f_{eo} が与えられたとき、金属ポスト間隔補正值 Δl を用いて、ポスト間隔 l_e に等しい素子間隔 l_c を持つ等価回路の中心周波数 f_{co} が求められる。これらの(12)、(13)式は、金属ポスト回路のポスト間隔と等価回路の素子間隔を $l_e = l_c$ としたときの両者の中心周波数の関係を金属ポスト間隔補正值 Δl を用いて表わしている。

なお、金属ポスト回路の中心周波数 f_{eo} のみが与えられたとき、これと同一の中心周波数を持つ等価回路の素子間隔 l'_c は(14)式の管内波長 λ_{cg} を λ_{eg} で置き換えた式で与えられ、この回路のポスト間隔 l_e は、この l'_c と金属ポスト間隔補正值 Δl を用いて(1)式により求めることが出来る。

3. 中心周波数の近似式⁽⁹⁾

筆者は、既に文献5において、金属ポスト回路のポスト間隔 l_e と等価回路の素子間隔 l_c を等しいと置いたときの両者の中心周波数の差 ΔF は、金属ポスト間隔補正

値 Δl の波数 $\Delta l/\lambda$ に対して直線的に変化し、大略、金属ポスト回路の中心周波数 f_{eo} と $\Delta l/\lambda$ の積になることを実験的に検討し、等価回路の中心周波数 f_{co} と $\Delta l/\lambda$ から金属ポスト回路の中心周波数 f_{eo} が推定出来ることを報告してきた。

本論文では、(12)、(13)式で示した中心周波数の関係式より中心周波数の差 ΔF の近似式を求め、上記の事項について検証する。

金属ポスト間隔補正值 Δl は素子間隔 l_c に比べて小さく、(3)式で示した中心周波数の差 $\Delta F = f_{eo} - f_{co}$ も等価回路の中心周波数 f_{co} に比べて小さい。 $\Delta l < l_c$ 、 $\Delta F < f_{co}$ として、(12)式を近似すると、 ΔF の近似式として次の ΔF_c の式が得られる。

$$\Delta F_c = K_c f_{co} (\Delta l / \lambda_{cg}) \quad (15)$$

$$K_c = \lambda_{co}^2 / (\lambda_{cg} l_c) \quad (16)$$

(13)式の場合も同様に、 $\Delta l < l_e$ 、 $\Delta F < f_{eo}$ として近似すると、 ΔF の近似式として次の ΔF_e の式が得られる。

$$\Delta F_e = K_e f_{eo} (\Delta l / \lambda_{eg}) \quad (17)$$

$$K_e = \lambda_{eo}^2 / (\lambda_{eg} l_e) \quad (18)$$

ポスト間隔と素子間隔を等しく、 $l_e = l_c = 20.0 \text{ mm}$ として、中心周波数 $8.4 \sim 10.4 \text{ GHz}$ の範囲での(16)式の K_c の値は $K_c = 1.017 \sim 1.145$ となる。又、(17)式の K_e も同様の値を取る。このように、既に実験的に検討し報告した結果に一致する。即ち、中心周波数と金属ポスト間隔補正值の波数との積は、金属ポスト回路と等価回路の中心周波数の差に大略等しくなる。

4. 実験結果及びその考察⁽⁷⁾

ここでは、第2、第3章で述べてきた金属ポスト回路と等価回路の中心周波数の関係について、実験値と比較し、検討していく。実験に使用される2段形金属ポスト共振回路は、方形導波管(WRJ-10)内H面の中央に立てた直径 $d = 2.0 \sim 4.5 \text{ mm}$ まで 0.5 mm 毎の真鍮の金属ポストで、それぞれの直径に対してポスト間隔 $l_e = 17 \sim 23 \text{ mm}$ の範囲において、7種類の寸法で構成されている。既に文献5において報告したように、筆者はこの2段形金属ポスト共振回路の共振減衰特性を測定し、中心周波数、挿入損失、半値幅及び Q 値を求めた。又、筆者が等価回路により導出した入力インピーダンス、透過減衰量の式を用いて、これらの共振減衰特性、 Q 値について実験値と計算値との比較検討を行ない、両者が良く一致することを示してきた。これらの結果を基にして、導出した計算式の有効性が確認され、金属ポスト間隔補正值が決定された。

図3は金属ポスト回路の中心周波数 f_{eo} の測定値とこの金属ポスト間隔補正值 Δl を用いて(12)式により求めた計算値を比較した結果で、両者は非常に良く一致して

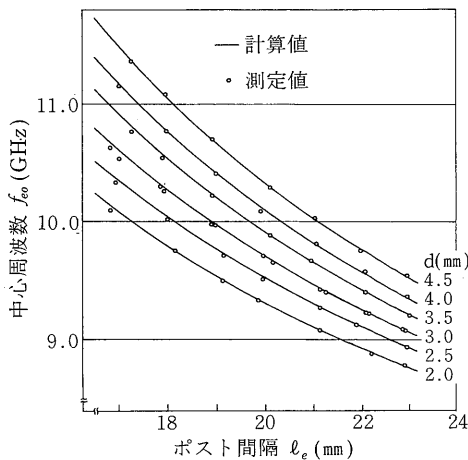


図-3 金属ポスト回路のポスト間隔 l_e と中心周波数 f_{eo} の関係

いる。なお、(12)式において、金属ポスト間隔補正值 Δl は文献5の表1で示した係数 a 、 b と次の実験式により与える。

$$\Delta l = (1 + a) l_e + b \quad (19)$$

この中心周波数の測定値と計算値の関係を詳しく調べるために、金属ポスト回路のポスト間隔と等価回路の素

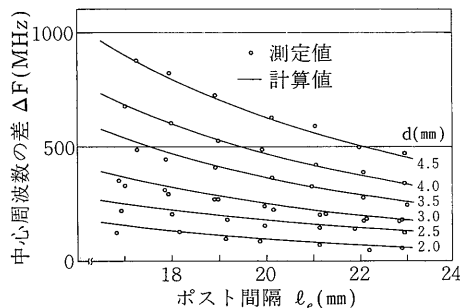


図-4 金属ポスト回路のポスト間隔と等価回路の素子間隔を等しく $l_e = l_c$ と置いたときの両者の中心周波数の差 ΔF

子間隔を等しく、 $l_e = l_c$ と置いた場合の両者の中心周波数の差 ΔF とそれぞれの中心周波数 f_{eo} 、 f_{co} を(3)式と(12)式より求めた。図4は、そのときの ΔF の実験値と共に示した結果である。測定値、計算値は非常に良く一致している。この ΔF の計算値に対する測定値の誤差は、金属ポスト直径 $d = 2.0 \sim 4.5$ mm で $12.0 \sim 17.6$ MHz の範囲にあり、平均値は 15.1 MHz である。中心周波数に対するこの誤差の割合は 0.2% 以下、平均で 0.15% である。以上に述べた結果は、ポスト間隔 l_e に等しい素子間隔 l_c を持つ等価回路の中心周波数 f_{co} と金属ポスト間隔補正值 Δl を用いて(12)式より、金属ポスト回路の中心周波数 f_{eo} を 0.2% 以内の誤差で求められることを示している。

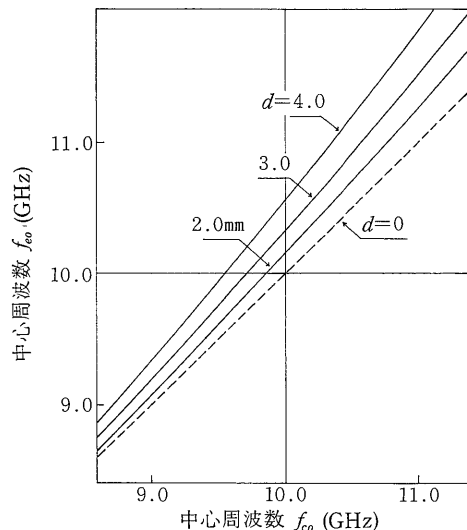


図-5 金属ポスト回路と等価回路の中心周波数 f_{eo} 、 f_{co} の関係

図5には、金属ポスト回路と等価回路の中心周波数の f_{eo} と f_{co} を(12)式を用いて求めた、金属ポスト直径 $d = 2.0, 3.0$ そして 4.0 mm の場合の計算結果を示している。破線は仮想的に金属ポスト直径を $d = 0$ としたときの直線で、両者の中心周波数は当然 $f_{eo} = f_{co}$ である。図5に示したように、 $l_e = l_c$ とすると、金属ポスト回路の中心周波数 f_{ec} は既に述べ理由により、等価回路の中心周波数 f_{co} より高くなる。又、ポスト間隔が短くなり、中心周波数が高くなる程、両者の差 ΔF が大きくなる。例えばポスト直径 $d = 3.0$ mm で、ポスト間隔が $l_e = 24.0, 20.0, 16.0$ mm と短くなるにしたがって、中心周波数の差はそれぞれ $\Delta F = 48.2, 92.3, 182.5$ MHz と大きくなっている。その理由は、ポスト間隔が短い程、金属ポスト間隔補正值、即ち金属ポストの等価幅がポスト間隔に占める割合が大きくなり、その結果、ポスト間隔が等価的に更なる短くなるためである。

次に、(13)式を用いて求めた中心周波数 f_{eo} と f_{co} の関係は、図5に示した(12)式による結果にほとんど一致しており、両者による計算値の誤差は中心周波数 f_{eo} の 0.03% 以内である。このように(12)式、(13)式とも金属ポスト回路のポスト間隔と等価回路の素子間隔を等しいと置いたときの中心周波数の関係式として有効であることが判る。

ここで、中心周波数の差 ΔF と金属ポスト間隔補正值の波数 $\Delta l / \lambda$ の関係について(12)式を用いて検討する。図6はポスト間隔と素子間隔が等しく、 $l_e = l_c = 18.0, 20.0, 22.0$ mm の場合の結果で、 Δl を管内波長 λ_{cg} の波数で表わしてある。実線は計算値で、それぞれの実験値は左下よりポスト直径 $d = 2.0, 2.5, 3.0 \dots 4.5$ mm に

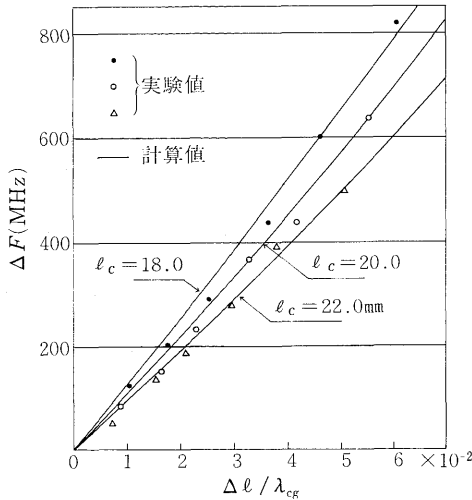


図-6 金属ポスト間隔補正值の波数 $\Delta l / \lambda_{cg}$ と中心周波数の差 $\Delta F = f_{eo} - f_{co}$ の関係

対応している。中心周波数の差 ΔF は、金属ポスト間隔補正值の波数 $\Delta l / \lambda_{cg}$ に対して少し下側に凸な曲線になっているが、その変化は、ほぼ直線的であると考えてもさしつかえない程度である。 $l_e = l_c = 18.0, 20.0$ そして 22.0 mm の計算値に対する実験値の誤差の平均はそれぞれ $13.3, 16.3$ そして 12.3 MHz で、計算値に対する割合はそれぞれ $4.4, 4.9$, そして 4.7% となっている。仮に、(15), (16) 式で示した近似式の K_c を求めてみると $l_c = 18.0, 20.0, 22.0$ mm に対して、それぞれ $K_c = 1.275 \sim 1.278, 1.15 \sim 1.169, 1.041 \sim 1.067$ となっている。(13) 式を用いた場合には、中心周波数の差 ΔF は金属ポスト間隔補正值の波数 $\Delta l / \lambda_{eo}$ に対して、反対に少し上側に凸な曲線になっている。しかし、(12) 式の場合と同様にほぼ直線的に変化しているとしてもさしつかえない程度である。この場合にも仮に、(17), (18) 式で示した近似式の K_e を求めてみると、 $l_e = 18.0, 20.0, 22.0$ mm に対して、それぞれ $K_e = 1.054 \sim 1.228, 0.984 \sim 1.116, 0.915 \sim 1.017$ となっており、 K_e の値は K_c に比べて、その範囲が広がっている。

5. 近似式の評価⁽⁹⁾

金属ポスト回路と等価回路の中心周波数の関係式、(12), (13) 式においても、中心周波数の差 ΔF は金属ポスト間隔補正值の波数 $\Delta l / \lambda$ に対して、ほぼ直線的に変化することを示してきた。ここでは、(3) 式と (12) 又は (13) 式より求められる中心周波数の差 ΔF と (15), (16) 及び (17), (18) 式の近似式より求められる中心周波数の差の近似値 $\Delta F_c, \Delta F_e$ を比較検討し、これらの近似式の評価をする。

図 7 に示したように、 ΔF_c の方が ΔF_e より良い近似を

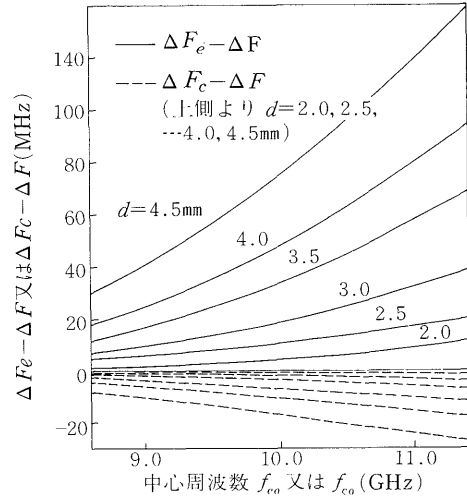


図-7 中心周波数の差の近似式 $\Delta F_c, \Delta F_e$ の誤差

与えることが判る。通常に使用される直径 $d = 3.0$ mm の金属ポストの場合には、中心周波数 $f_{eo} = 9.0 \sim 10.0$ GHz の範囲において、 $\Delta F_c - \Delta F = -2.3 \sim -4.2$ MHz, $\Delta F_e - \Delta F = 9.3 \sim 18.7$ MHz である。このように、 ΔF_e を用いる場合の誤差は ΔF_c の場合に比べて 4 倍程度大きくなる。その理由は、 $\Delta F_c, \Delta F_e$ を (12) 及び (13) 式から求めるときの近似度によるものである。即ち、 $\Delta l < l_c, \Delta l < l_e$ として (12), (13) 式中の $(1 + \Delta l / l_c)^2$ 及び $1 / (1 + \Delta l / l_e)^2$ を近似するとき、後者の近似度の方が 4 倍程度悪くなる。以上に述べてきたように、(15), (16) 式で示した中心周波数の差の近似式 ΔF_c は、直径 $d = 3.0$ mm までの金属ポストで、中心周波数 $f_{eo} = 9.0 \sim 10.0$ GHz の範囲で、 ΔF に比べて 5 MHz 以内の誤差で使用出来る。 ΔF と ΔF_c との誤差は中心周波数の 0.05% 以内である。特定の条件のもとで、中心周波数の差を求める近似式 ΔF_c を使用出来ることが判る。この近似式を用いた場合には、金属ポスト回路の中心周波数 f_{eo} を 0.25% 以内の誤差で決定出来る。

6. 結言

金属ポストを用いたマイクロ波デバイスの中心周波数を決定するために、本論文では 2 段形金属ポスト回路のポスト間隔と等価回路の素子間隔を等しいと置いた場合の両者の中心周波数の関係について、既に決定した金属ポスト間隔補正值を用いて解析し、実験的検討も加えた。次に述べる結果が得られた。

- (1) 金属ポスト回路と等価回路の中心周波数の関係式を導出し、計算値と実験値との比較を含めた検討をすることにより、両者の中心周波数についての関係式の有効性を確認した。

- (2) その結果, 金属ポスト回路の中心周波数が, ポスト間隔と等しい素子間隔の中心周波数と金属ポスト間隔補正值を用いて, 関係式から 0.2%以内の誤差で決定出来ることを明らかにした。
- (3) 中心周波数についての近似式を上記の関係式より導き出して, 既に実験的に検討して報告した結果の妥当性を明らかにした。
- (4) この近似式の評価を行ない, 特定の条件のもとでは, 中心周波数の差を与える近似式 ΔF_c が有効であることを示し, この近似式を用いても, 金属ポスト回路の中心周波数が 0.25%以内の誤差で求められることを明らかにした。

今後, 本論文中で求めた金属ポスト回路の中心周波数の関係式及び既に求めてある金属ポスト間隔補正值を用いて, 金属ポスト回路, 例えば, 金属ポストを用いたフィルターの設計を行ない, 実験的検討も加えて行きたい。

本研究は, 本学特別研究費の援助によって行なったもので, 関係各位に心から感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 今井 弘: "広帯域マイクロ波PINダイオード減衰器の設計", 中部工大紀要, 15-A, pp. 59~66(1979).
- (2) 今井 弘: "帯域設計法によるマイクロ波3段形PINダイオード減衰器", 中部工大紀要, 17-A, pp. 35~42(1981).
- (3) 今井 弘: "帯域設計法によるマイクロ波3段形PINダイオード減衰器II", 中部工大紀要, 18-A, pp. 59~66(1982).
- (4) 石井 宗典, 他: "電子回路設計シリーズ マイクロ波回路" p.118, 日刊工業新聞社(昭44-02).
- (5) 今井 弘: "矩形導波管中の金属ポストの補正值", 中部大工学部紀要, 20, pp. 27~33(1984).
- (6) 小口 文一: "マイクロ波およびミリ波回路", pp. 250~252, 丸善(昭39-02).
- (7) 今井 弘: "金属ポスト共振回路の中心周波数", 昭59 東海支部連大, 314.
- (8) Marcuvitz, N: "Waveguide Handbook", pp. 257~263, Dover (1951).
- (9) 今井 弘: "矩形導波管形金属ポスト回路の中心周波数の決定", 昭59北陸支部連大, 205.