

# PBG構造フェライトマイクロストリップ線路

堤 誠\*

## On the PBG Ferrite Microstrip Line

Makoto Tsutsumi

### Abstract

We have studied photonic band gap (PBG) structure on the microstrip line on ferrite substrate. Two types of periodic structure of ferrite strip line were proposed. One is the ferrite stripline which is alternatively arranged with the microstrip line on dielectric substrate. Other is the ferrite microstrip line loaded with periodically shorted stub. Brillouin diagrams of their lines were calculated using microwave network approach. Stopband phenomenon due to Bragg reflection of the lines was experimentally demonstrated. They are explained with theory of good physical meaning and accuracy.

### I まえがき

マイクロ波並びに光回路に周期的な摂動を与えると、ブラッグ反射や漏洩現象が現れる事は古くから知られ、これらはフィルタやアンテナに応用されている[1]。最近、この周期構造が二次元あるいは三次元の構造に拡張され、新しい機能を有するフィルタやアンテナの研究が行われ、これをホトニクスバンドギャップ(PBG)構造と呼んでいる[2]。PBG構造は現在のところ光回路に有効で、線路の曲がりからの漏洩現象の抑圧、発振器における電力の閉じ込め、そしてアンテナの高次モード励振の抑圧等[3]、特異な効果が期待されている。しかしながら、これらのPBG構造は誘電体媒質を対象にしており、これを磁気光学媒質、フェライトなどの磁性体媒質に拡張された例は少ない[4]、[5]。

本稿は周期構造(PBG)を装荷したフェライト基板マイクロストリップ線路のブラッグ反射(透過)特性を理論的並びに実験的に考察したものである。

### II 理論

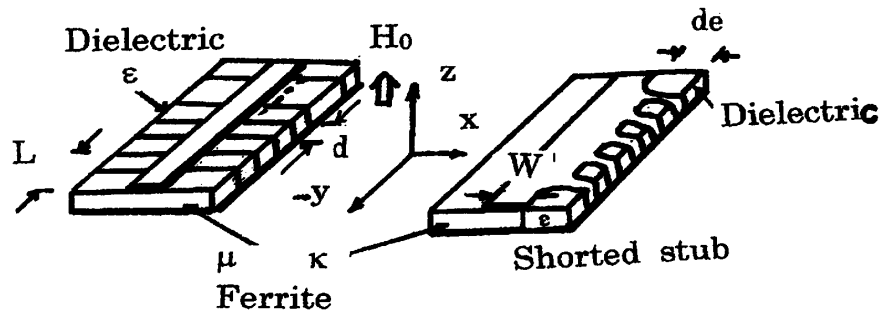
周期構造線路における理論的取り扱いの特異摂動法が有効な手法であるが[4]、[5]、実際に試作された周期構造のパラメータが摂動量を超えることと、現在のところ特異摂動法による解で実験結果を十分説明できないことから、ここでは等価回路法により伝播特性を明らかにする。

問題の構成を図1に示す。同図はフェライト基板と誘電体基板を周期的に装荷したマイクロストリップ線路と誘電体基板を介してフェライト基板上のマイクロストリップ線路を周期的に短絡した線路を示す。いずれもフェライト基板は磁界  $H_0$  で面に垂直に磁化され、

---

\* 宇宙通信工学科

また、基板は幅Wのストリップが装荷されているものとする。



(a) 誘電体—フェライト周期構造線路 (b) 周期的にストリップを短絡した線路

図1 問題の構成

図1に示すフェライト中の電磁界はマクスウェルの方程式とフェライトの透磁率テンソル $\hat{\mu}$ から

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E},$$

$$\hat{\mu} = \begin{vmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu_0\hat{\mu}\mathbf{H}, \quad (1)$$

$$\mu = 1 + \omega_h\omega_m / [(\omega_h)^2 - \omega^2],$$

$$\kappa = \omega\omega_m / [(\omega_h)^2 - \omega^2],$$

$$\omega_h = \gamma\mu_0 H_0, \quad \omega_m = \gamma\mu_0 M_0$$

で与えられる。(1)式で直流磁界  $H_0$  の印加方向に界が依存しないものとする、 $\partial/\partial z = 0$  の条件から

$$\begin{aligned} H_x &= -1/[j\omega\mu_0(\mu^2 - \kappa^2)]\{\mu\partial E_z/\partial y + j\kappa\partial E_z/\partial x\}, \\ H_y &= 1/[j\omega\mu_0(\mu^2 - \kappa^2)]\{\mu\partial E_z/\partial x - j\kappa\partial E_z/\partial y\}, \\ \partial^2 E_z/\partial x^2 + \partial^2 E_z/\partial y^2 + \omega^2\epsilon\mu_0\mu_{\text{eff}}E_z &= 0, \\ \mu_{\text{eff}} &= (\mu^2 - \kappa^2)/\mu \end{aligned} \quad (2)$$

の関係を得る。

(2)式で  $x = 0$ 、 $w$  で  $H_y = 0$  の磁壁の境界条件を考慮すると

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon\mu_0\mu}, \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\omega^2\epsilon\mu_0\mu_{\text{eff}} - (n\pi/w)^2} \quad (4)$$

の分散関係式を得る[5]。ここで(3)式はフェライト基板マイクロストリップ線路におけるエッジガイドモードの、(4)式は磁気壁モードの分散関係式を示す。

ここではこのブラッグ反射特性を等価回路法を用いて求める[1]。長さ1のフェライトストリップ線路における等価電圧及び電流を

$$V = A^+ e^{j\beta y} + A^- e^{j\beta y} \quad (5)$$

$$I = A^+ / Z_0^+ e^{j\beta y} - A^- / Z_0^- e^{j\beta y} \quad (6)$$

と置く。ここに $\beta$ は(3)または(4)式の伝播定数であり、 $Z_0$ は特性インピーダンスである。  
ポインティング電力を(2)式から求め、

$$P_y = 1/2 \int_0^w E_z H_x dx$$

$$= [\mu_{eff}/4\gamma\omega\mu_0 (\mu^2 - \kappa^2)] \{ (1 + \kappa^2\omega^2\epsilon\mu_0/\mu\gamma^2)(\beta \sinh(2\gamma w))/2 + (\kappa/\gamma)(\omega^2\epsilon\mu_0 + \beta^2/\mu) \sinh^2(\gamma w) \} |A|^2$$

$$\gamma = \kappa\beta/\mu \quad (7)$$

と等価電圧

$$E = \sqrt{|A|^2 / w \int_0^w \{ \cosh \gamma x + \kappa\beta/\mu\gamma \sinh(\gamma x) \}^2 dx} \quad (8)$$

から、特性インピーダンス  $Z_0$  は

$$Z_0 = |E|^2 / P_y \quad (9)$$

と定義する。同じく誘電体基板マイクロストリップ線路における、長さ  $d$  区間における電圧、電流を仮定し、特性インピーダンス、そして伝播定数

$$Z_{0e} = 2\omega\mu_0/\beta_e w, \quad (10)$$

$$\beta_e = \omega\sqrt{\epsilon\mu_0} \quad (11)$$

と置く。(5)から(11)式を用いて各区間毎、 $l$  または  $d$  の四端子定数  $A_0, B_0, C_0, D_0$  を求め、これを縦続接続すれば、図1に示す線路の単位区間の周期構造の四端子定数が求まる。フロクエの定理から、周期構造線路における伝搬定数  $\Gamma$  として

$$\cosh(\Gamma L) = (A_0 + D_0)/2$$

$$= \cos(\beta_e d) \cos(\beta l) - [(Z_0^2 + Z_{0e}^2)/2 Z_0 Z_{0e}] \sin(\beta_e d) \sin(\beta l)$$

$$L = d + l \quad (12)$$

が求まる。

(12)式で  $d=l=3\text{mm}$ 、誘電体基板マイクロストリップ線路の比誘電率を 2.6、フェライトの比誘電率を 13、 $\mu_0 H_0 = 0.1\text{T}$ 、飽和磁化  $\mu_0 M_0 = 0.173\text{T}$  とし、 $\Gamma$  を求め、図に示すと、図2の如くなる。同図で、9.5GHz 付近でブラッグ反射によるストップバンド特性  $\Delta f$  が現われ、ストップバンド幅 4.5GHz で最大 8.6 dB/cm の反射(減衰)がブラッグ周波数  $f_0$  で生じる。同図には誘電体基板マイクロストリップ線路の誘電率を 8 に選んだ場合の特性も示す。このように誘電体の誘電率を変えれば、ストップバンド特性を制御できる。

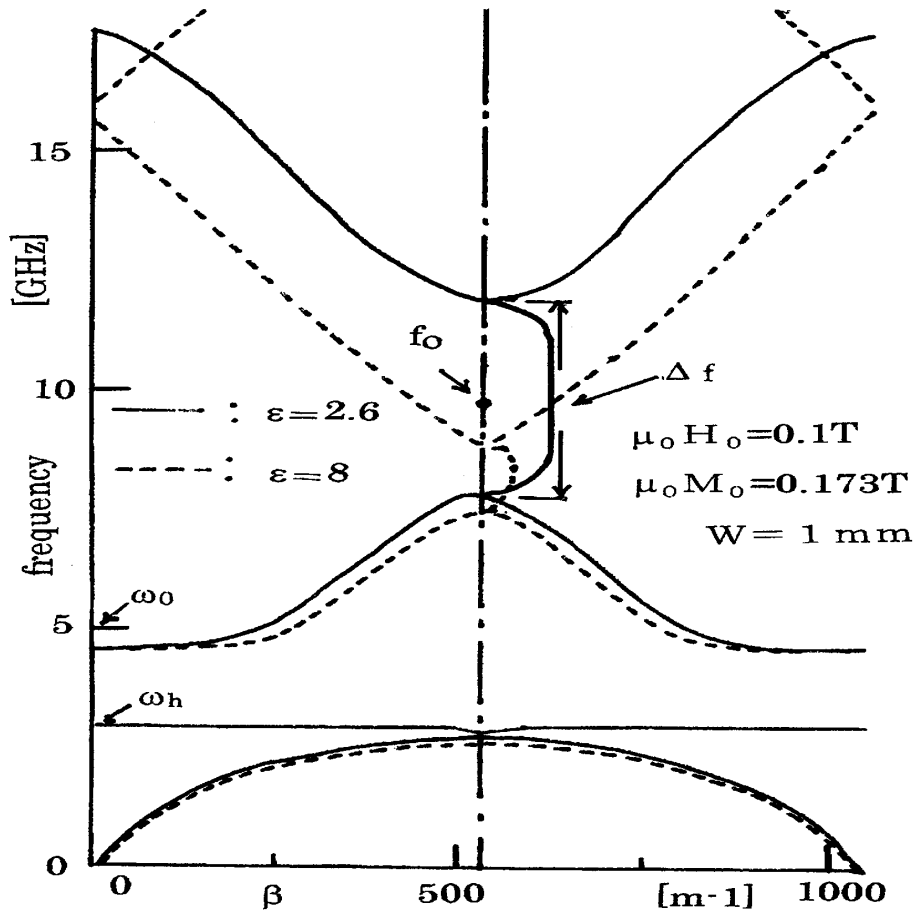


図2 誘電体—フェライト周期構造線路のブリルアンダイアグラム

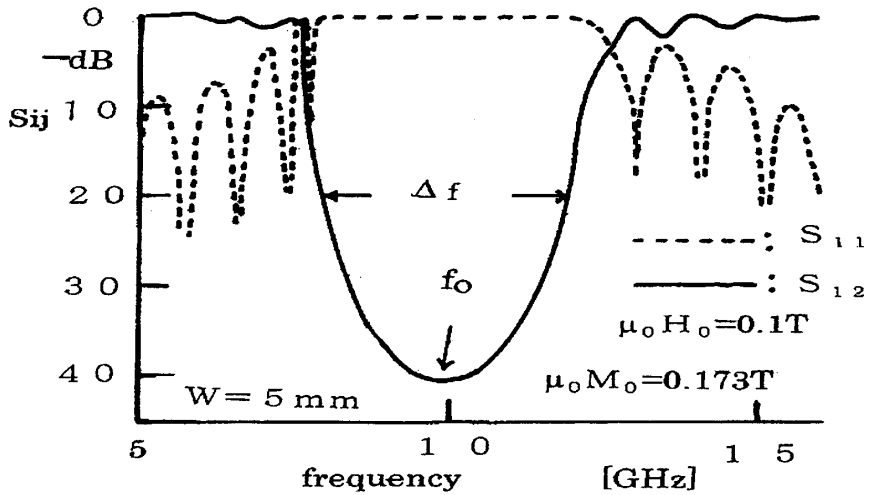


図3 誘電体—フェライト構造線路の散乱パラメータ

次にこのブリルアンダイアグラムを基礎として、散乱パラメータ  $S$  を求める。これは(12)式の四端子定数を  $n$  個従続接続し、その合成四端子定数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  と  $S$  パラメータとの関係、

$$\begin{aligned} S_{11} &= [B \cdot Z_{00} D + Z_{00} (A \cdot C Z_{00})] / [B + Z_{00} D + Z_{00} (A + C Z_{00})] \\ S_{12} &= 2 Z_{00} / [B + Z_{00} D + Z_{00} (A + C Z_{00})] \end{aligned} \quad (13)$$

であるから、これから  $S_{11}, S_{21}$  が求まる。ここに  $Z_{00}$  は電源の負荷抵抗  $5 \cdot 10^{-4} \Omega/m$  である。

図 3 は誘電体とフェライトを周期的に装荷したストリップ線路における  $S_{21}$  と  $S_{11}$  の特性を示す。この図から  $f_0 = 10 \text{GHz}$  において  $-20 \text{dB}$ 、 $\Delta f = 3.8 \text{GHz}$  の阻止帯域が現れ、反射特性  $S_{11}$  はほぼ  $0 \text{dB}$  である。なお、この場合、周期構造の数  $n$  は 7 である。この特性は図 2 に示すブリルアンダイアグラムと比較して論じることが出来る。

一方、図 1(b) に示す線路の場合、(12) 式の四端子定数  $A, B, C, D$  に短絡ストリップ線路のアドミタンス

$$Y = -j(1/Z_{0e}) \cot(\beta_e d_e) \quad (14)$$

を従続接続すると、この線路の  $S_{11}, S_{21}$  を評価できる。なお、(14) 式の  $d_e$  は短絡するスタブの長さである。図 4 は  $\mu_0 H_0 = 0.3 \text{T}$ 、短絡ストリップの長さ  $d_e = 3 \text{mm}$ 、周期  $L = 6 \text{mm}$ 、 $W = 1 \text{mm}$  の誘電体基盤の比誘電率 2.6 とした場合の、 $S_{11}, S_{21}$  特性を示す。この図から  $7 \text{GHz}$  付近においてブラッグ反射特性が現れる事が分るが、概して、この線路のブラッグ反射特性は明確でない。なお、図中に示す  $\omega_b = 8.4 \text{GHz}$  と  $\omega_0 = 10.5 \text{GHz}$  との間で波動は  $\mu$  が負のために遮断される。

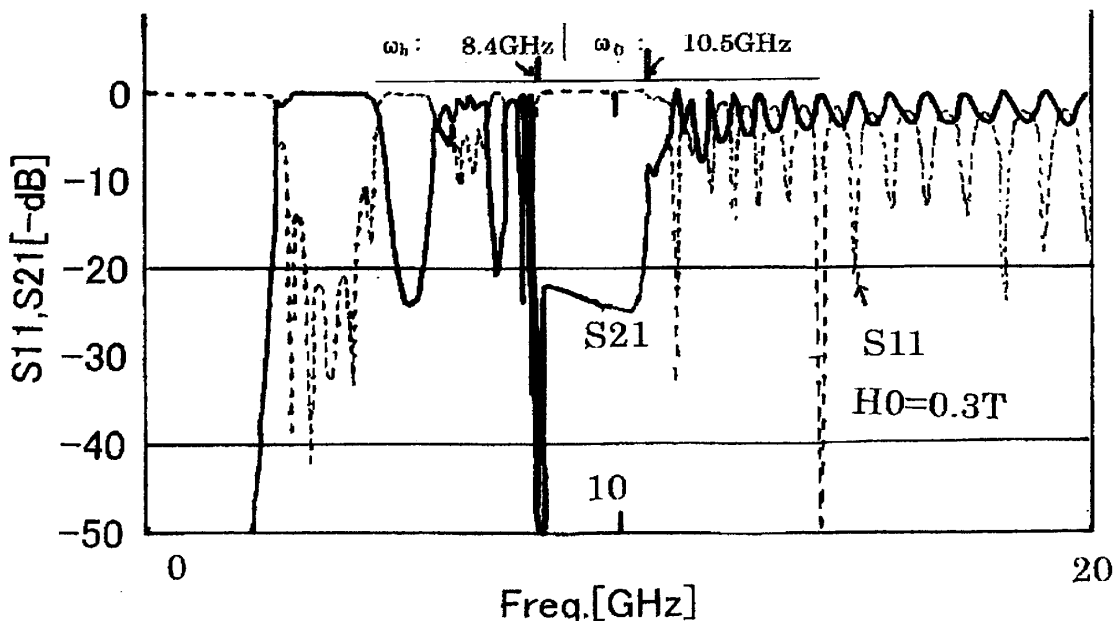


図 4 周期的にストリップを短絡した線路の散乱パラメータ

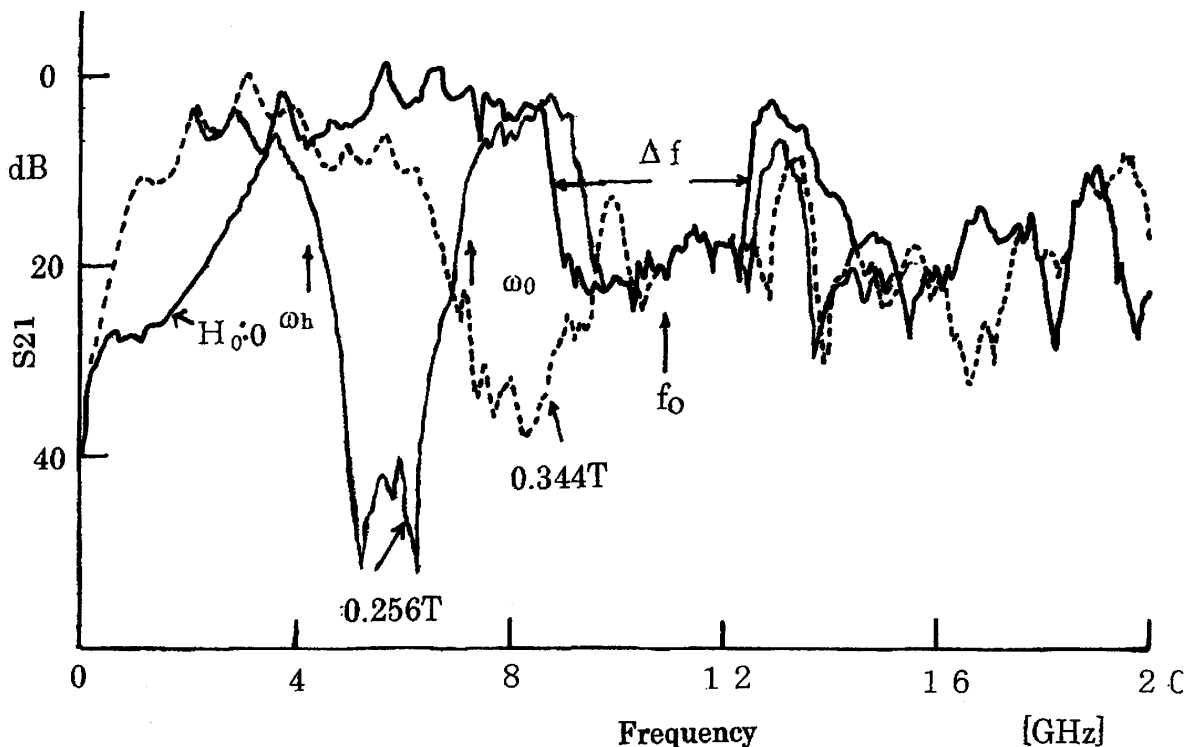
### III 実験結果

試作した周期構造線路の 1 つは寸法  $3 \text{mm} \times 15 \text{mm}$  そして厚さは  $1 \text{mm}$  のフェライト (YIG 多結晶) スラブと、寸法  $3 \text{mm} \times 15 \text{mm} \times 1 \text{mm}$  で比誘電率が 2.6 の誘電体スラブからなる。これらの基板の上に幅  $1 \text{mm}$  のストリップ線路を装荷する。周期構造の数は 9

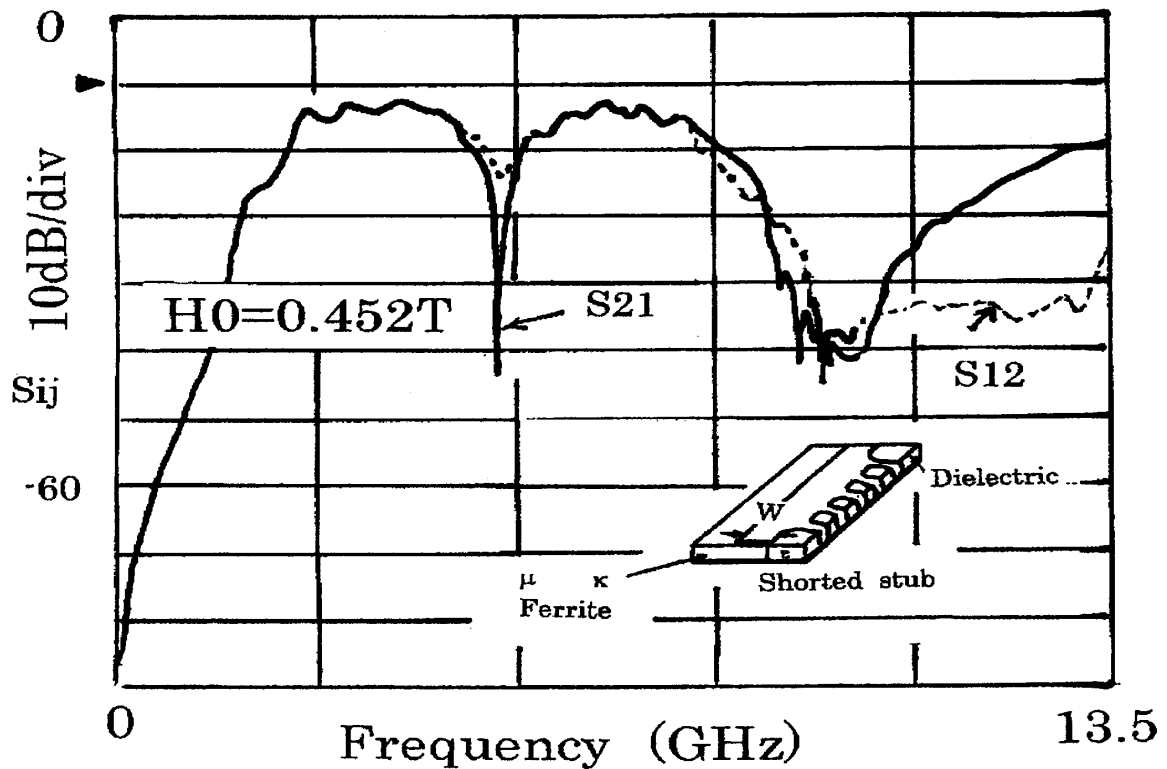
つで入出力回路を含めて全長は 70mm である。2 つ目の線路は長さ 55mm、幅 15mm、厚さ 1mm のフェライトスラブの側面に長さ 55mm、幅 3mm、厚さ 1mm、 $\epsilon_r=2.6$  の誘電体基板を装荷し、その上に幅 1mm で長さ 3mm のの短絡したストリップ線路を周期 6mm で 9 個並べる。

図 5 は実験結果を示す。図 5 の (a) は誘電体とフェライトとの周期構造の場合の実験結果で、磁界が零の場合  $f_0=11\text{GHz}$  で 3GHz のブラッグ反射によるストップバンド特性が現れている。この特性は図 3 に示す散乱パラメータによる特性  $\Delta f=3.8\text{GHz}$  に近い値である。ただし、挿入損が 6dB 内外と大きく  $S_{11}$  特性は明確な形では観測できなかった。次に磁界  $H_0$  が加わると新しく  $\mu$  が負になる  $\omega_h$  と  $\omega_0$  の間の周波数帯域で約 2GHz の遮断特性が現れ、これが磁界を増すにつれて  $f_0$  に近ずき、ブラッグ反射特性に磁気同調性を与えることになる。更に磁界を増やすと  $\Delta f$  の中に  $\mu$  が負になる帯域が入り込み、ブラッグ反射特性を崩すことになる。このようにブラッグ反射特性は  $\mu$  が負になる帯域のエッジ  $\omega_h$  と  $\omega_0$  の近くで磁界の影響を強く受ける。

図 5 の (b) は 1 端を周期的に短絡した場合の線路の実験結果である。この場合、鋭いノッチ特性が 8GHz 付近で現れる。このノッチ特性は図 4 に示す散乱特性と類似するが、実験値はブラッグ反射特性の帯域が狭く、さらに  $S_{12}, S_{21}$  の特性の違いによる非可逆性が現れる。これは理論値において空間的な取り扱い、ストリップの幅方向  $W, +x$  と  $-x$  との違いによる回路解析の考察が十分でない事によるものと考ええる。なお、このように誘導負荷を周期的にフェライト伝送路に装荷する事は、基本的に LHM(Left Handed Material)回路が構成されるものと考ええる[6]、[7]。



(a) 誘電体—フェライト周期構造線路



(b) 周期的にストリップ線路を短絡した線路

図 5 実験結果

## IV むすび

光およびPBG誘電体周期構造に関連してPBGフェライトマイクロストリップ線路のブラッグ反射特性を等価回路法により理論的に取り扱い、ブリルアンダイアグラムおよび散乱パラメータを明らかにした。次に2種類のフェライトマイクロストリップ線路を試作し、それらのブラッグ反射特性を実験により確かめた。その結果、i) PBGフェライト構造では $\mu$ が負の場合に生じる遮断特性がブラッグ反射特性を与える周波数に近ずくと、ブラッグ反射特性の磁気同調特性が顕著になる。ii) 周期的に短絡したマイクロストリップをフェライト線路に装荷すると、ノッチ型のブラッグ反射特性が現れるとともに非可逆性が現れる。今後の課題として $\mu$ が負の場合に生じる遮断特性とブラッグ反射特性との関係の解明、そしてフェライトPBG構造によるLHM回路の構成の問題が残される。

## 謝辞

本研究は一部福井工業大学の特別研究費により行つた。また、実験でお世話になつた大阪工業大学の小寺敏郎講師に感謝の意を表す。

## 参考文献

1. R.E.Collin ; "Foundations for Microwave Engineering", McGraw-Hill Book Company, 1966.

2. 川上彰二郎 ; “フォトニクス結晶材料とその応用” シイエムシー出版 、平成 14 年。
- 3 .Y.Horii and M.Tsutsumi: "Harmonic Control by Photonic Bandgap on Microstrip Patch Antenna",IEEE Microwave and Guided Wave Letters,vol.9,no.1,pp.13-15.(Jan.1999).
- 4 .堤誠 ; “磁区が周期的に反転する磁気光学媒質における波動の伝播特性”,電気関係学会北陸支部連合大会 D-20( 平成 12 年 9 月 ) 。
- 5 . 堤誠 ; “周期的に磁化されたフェライト基板マイクロストリップ線路の伝播特性”、電気関係学会北陸支部連合大会、C-28、(平成14年9月)。
- 6 G.V.Eleftheriades ,A.K.Iyer and P.C.Kremer,"Planer Negative Refractive Index Media Using Periodically L-C Loaded Trasmission Lines" ,IEEE Trans. MTT.,50,12,pp.2702-2712(Dec.2000).
- 7 堤誠; “周期構造フェライト導波路について、LHM 回路の提案”、電気関係学会北陸支部連合大会、C-40 (平成15年9月)。

(平成15年12月1日受理)