

フェライトマイクロストリップ線路における左手系の伝送特性

堤 誠*

Left Handed Transmission Characteristics on the Ferrite Microstrip line

Makoto Tsutsumi

Abstract

Left handed transmission (LHT) characteristics on the ferrite microstrip line were investigated both theoretically and experimentally. Scattering parameters of the line were derived through equivalent circuit model, which is a function of loaded capacitance and inductance. It was found that edge guided mode can propagate under limited frequency of negative permeability of ferrite. Experiments were undertaken using $15 \times 52 \times 1 \text{ mm}^3$ ferrite substrate with shorted stub and lumped capacitance. Strong nonreciprocal behavior more than 20 db was observed at frequency of backward wave region. An application of the line was discussed briefly.

I まえがき

最近、左手系(LHM-Left Handed Media)あるいは、負の屈折率(NRI-Negative Refractive Index)と呼ばれる媒質における電磁波の伝搬や散乱の問題が大きく取り上げられている[1][2]。さらに、左手系媒質は従来の分布定数線路に集中定数回路素子を周期的に装荷することにより構成出来ることがトロント大学の G.V.Eleftheriades らによつて明らかにされると[3]、左手系の回路素子、デバイスの研究が UCL の伊藤らによって精力的に行われ、新しい形のカップラ、ハイブリッドリング、アンテナなどが報告されている[4][5]。

本稿では左手系の回路をフェライト基盤マイクロストリップ線路上に構成し、誘電体マイクロストリップ線路には見られない、i)同調性。ii)非可逆性。iii) 負の透磁率における伝送特性などを明らかにする。

II 理論

図1に提案する左手系のフェライト線路を示す。この構造は z 方向に H_0 で磁化されたフェライト基板と誘電体基板からなり、その上に長さ d で周期 l のスタブが装荷された幅 w

* 宇宙通信工学科

のマイクロストリップ線路が設置されている[6]。また、左手系特性を与えるために容量 C が周期的に装荷されている[7]。図2に G.V.Eleftheriades らによって論じられた左手系の線路の等価回路示す[3]。同図はよく知られた単位周期長 l あたりの分布定数線路に集中定数の容量 C とインダクタンス L が装荷されている。この回路で等価的に透磁率 μ 、誘電率 ϵ が負になる左手系特性を与えるには、従来の分布定数線路の C_0, L_0 との間で共振($C_0 L, L_0 C$)回路を構成すれば良い。なお、フェライト線路では透磁率 μ が負となる周波数帯域があるので、後に述べるように負荷容量 C は基本的に必要としない[7]。

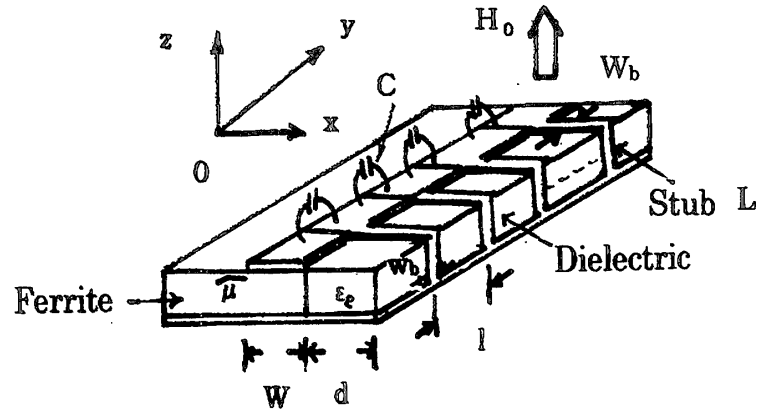


図1 フェライトと誘電体基板上に作成された左手系の線路

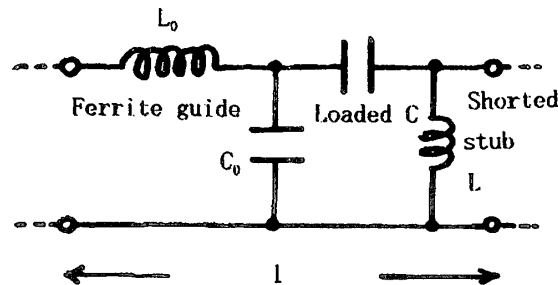


図2 左手系の線路の等価回路

フェライト媒質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

$$\begin{aligned}
 \nabla \times \mathbf{H} &= j\omega\epsilon\mathbf{E}, \\
 \hat{\mu} &= \begin{bmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ & & 1 \end{bmatrix} \\
 \nabla \times \mathbf{E} &= -j\omega\mu_0\hat{\mu}\mathbf{H}, \\
 \mu &= 1 + \omega_h\omega_m / (\omega_h^2 - \omega^2) = (\omega_o^2 - \omega^2) / (\omega_h^2 - \omega^2) \\
 \kappa &= \omega\omega_m / (\omega_h^2 - \omega^2), \\
 \omega_h &= \gamma\mu_0 H_0, \quad \omega_m = \gamma\mu_0 M_0, \quad \omega_o = \sqrt{\omega_h(\omega_h + \omega_m)}
 \end{aligned} \tag{1}$$

で与えられる。(1)式で H_0 の印加方向 z に界が依存しないものとする、 $\partial/\partial z=0$ の条件から、電磁界成分、 H_x, H_y, E_z が求まる[6]。次にストリップ幅 w で $H_y=0$ の磁壁の境界条件を考慮すると、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分散関係式

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon \mu_0 \mu} \quad (2)$$

を得る[8]。この場合、伝搬定数 β は μ が正の場合には実数となり波動は伝搬し、 μ が負になると、 β は虚数となり、波動は減衰する。

次に長さ $l/2$ 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、特性インピーダンス Z_0 を含めて定義し、四端子定数 A_0, B_0, C_0, D_0 を求める。この四端子定数を図2に示す等価回路に従って、従続接続すると

$$\begin{bmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1/(j\omega C) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega L & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

と置ける。ここにインダクタンス L は図1に示す誘電率 ϵ_e の誘電体基板上に作成された長さ d の短絡スタブである。

この回路の伝搬定数 Γ は $A_T D_T - B_T C_T = 1$ の可逆性の仮定から

$$\cosh(\Gamma l) = (A_T + D_T)/2 \quad (4)$$

の関係から求まる[9]。次に(3)式の四端子定数を周期 l で N 個従続接続し、その合成四端子定数を導出し、散乱行列 S パラメータを求める。

図3は S パラメータ特性を 4GHz 以下と左手系特性が現れる周波数帯域に限り、且つ磁界を 0.1T から 0.3T まで変えて、その同調性を数値的に評価したものである。用いた線路パラメータは $l=6\text{mm}, d=3\text{mm}, \mu_0 M_0=0.173\text{T}, \mu_0 H_0=0.1\text{T} \sim 0.3\text{T}, w=w_b=1\text{mm}$, 装荷する容量 $C=0.1\text{pF}$ である。この図から、 150KHz/Oe の磁気同調性は現れるが、その変化量は小さい。

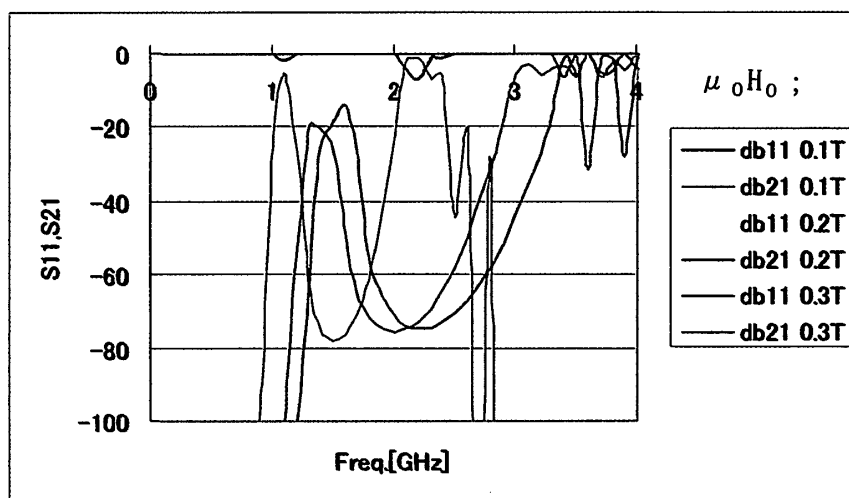


図3 フェライト左手系線路の磁界依存性

図4は(4)式から求まるこの左手系の回路における分散曲線(周波数-伝搬定数 β)を示す。磁界の強さは0.08Tと0.1Tに選んでいる。1GHz付近に後退波特性が現れると共に、磁界による同調性も現れる。

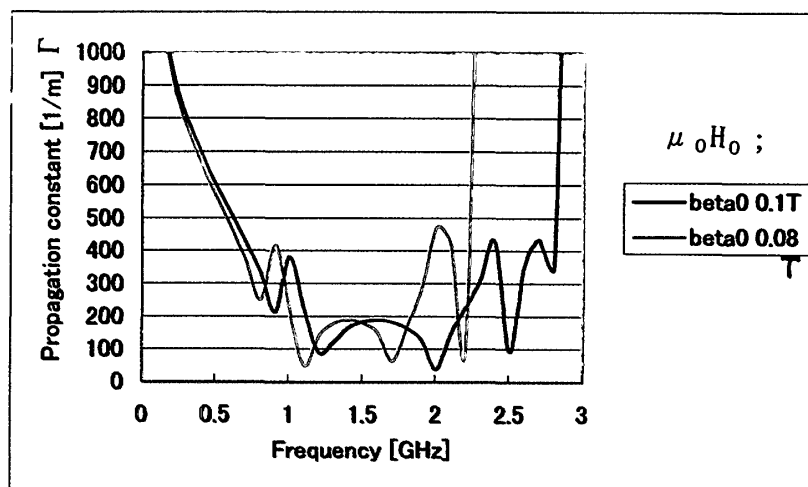


図4 フェライト左手系線路の分散曲線の磁界依存性

次に μ が負になる帯域における伝搬定数と特性インピーダンスを求める。伝搬定数は(2)式から

$$\beta_i = \omega \sqrt{\epsilon \mu_0 (-\mu)} \quad (5)$$

となり、 β は $\omega_b/(2\pi)$ と $\omega_o/(2\pi)$ との間の周波数帯域で虚数となる。また、ポインティング電力と等価電圧から求まる特性インピーダンス Z_{0i} は準虚数になる。さらにこの場合、等価的に図2示す L_0 はCになり、左手系のフェライト線路は並列Lのみで構成できることになる[7]。

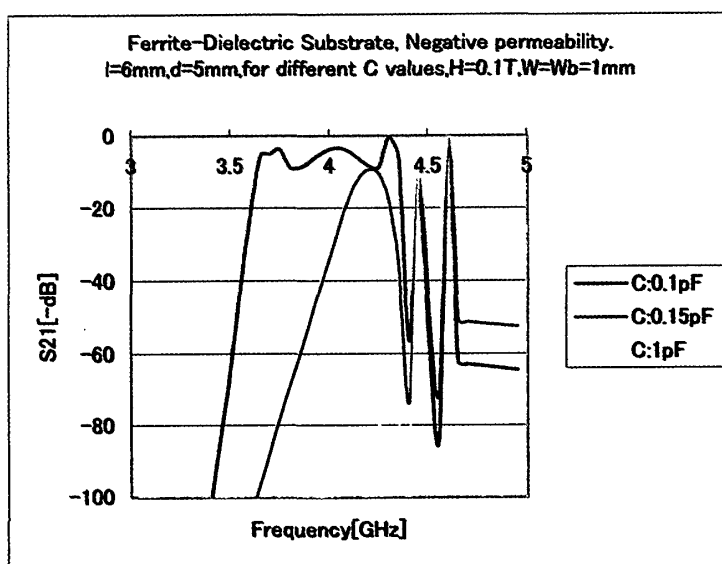


図5 μ が負になる帯域における散乱パラメータ

図5は散乱パラメータを $H_0=0.1T$ に選び、 μ が負になる周波数帯域 ω_h ($f_h=\omega_h/(2\pi)$)

$=2.8\text{GHz}$)と $\omega_0(f_0=\omega_0/(2\pi)=4.65\text{GHz})$ で求めたもので、スタブの長さ d を 5mm と固定し、直列容量を 0.1pF から 1pF まで変えている。図に示すように様に左手系の動作を使うと、 μ が負になる 2.8GHz から 4.65GHz の帯域においても波動は減衰せず伝搬する事になる。また、帯域幅は負荷容量により大きく変化する、容量が小さいと帯域は広くなる。

III 実験結果

試作した左手系の回路は図 1 に示すようなもので、寸法は幅 15mm 、長さ 52mm そして厚さ 1mm のフェライト (YIG 多結晶) スラブ上に幅 $1.5\text{mm}(w=w_b)$ のストリップ線路を装荷する。また、負荷容量 C は 1pF で誘電率 2.6 の基板上に作成されたスタブの長さ d は 3mm である。装荷した C-L の個数 N は 8 、周期 l は 6mm である。これを径 60mm の電磁石中に挿入し、測定された散乱パラメータ特性を図 6 に示す。この場合、印加磁界の強さは 0.265T で掃引周波数幅は 14GHz である。

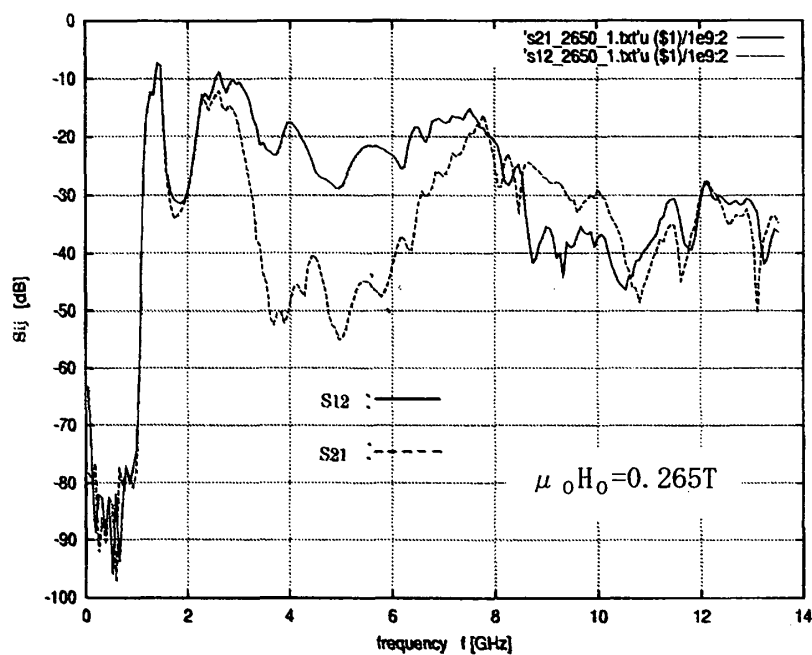


図 6 散乱パラメータの実験結果

この実験結果から挿入損は平均して 20dB と大きい、 S_{21} と S_{12} の違いにより 5GHz 付近で 20dB 以上の非可逆性が現れる。一方、 1.5GHz 付近で挿入損が 8dB と比較的小さい形で現れるピークが左手系による特性である。この左手系の特性が現れる帯域をより詳しく調べるために、図 7 は周波数を 3GHz 以下を選び、測定された散乱パラメータの磁界依存性である。この場合、磁界を 0.216T から 0.77T まで変えている。磁界の強さによる同調性は 18KHz/Oe と図 3 に示す理論値 (150KHz/Oe) と比較してかなり小さい。これは一つは同調性に飽和特性があること、更にフェライトの磁氣的な損失によるものと考えられる。

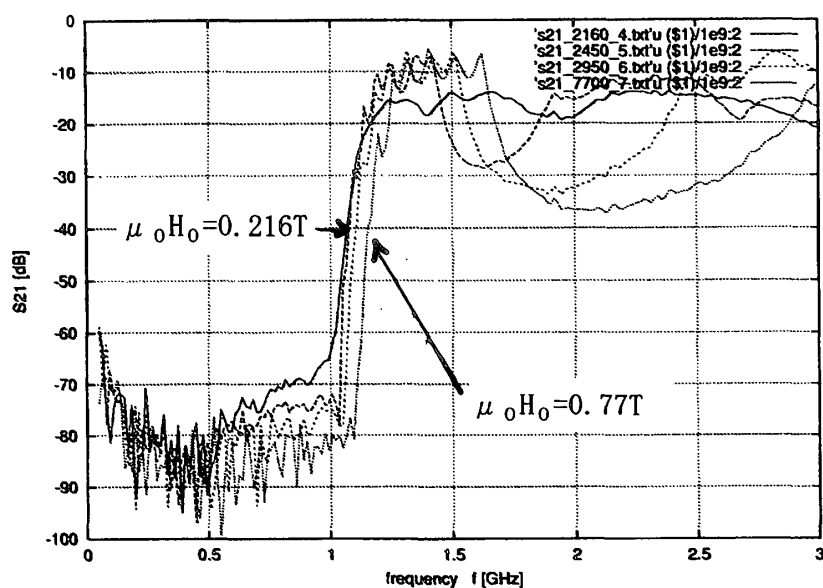


図7 測定されたフェライト左手系線路の磁界依存性

図8は図7に示す1.5GHz付近の分散特性を遅延量で測定したもので、この図から左手系特有の負の群速度特性が現れることが分かる。これらから、理論値はほぼ実験値により確かめることが出来たが、理論値の負荷容量が0.1pFに対して実験値は1pFである。この違いは実験に用いた集中定数線路の容量の高周波特性によるものであると考える。

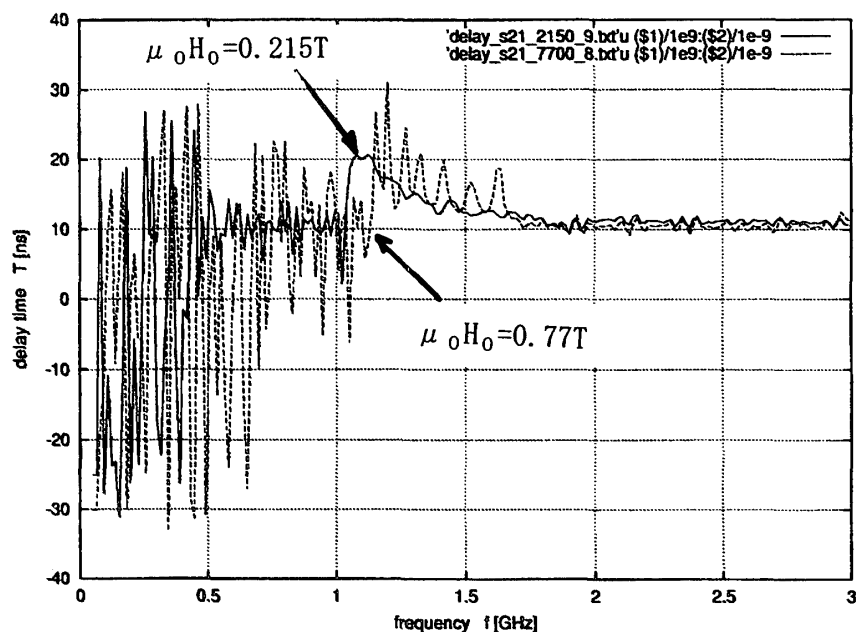


図8 遅延と後退波特性

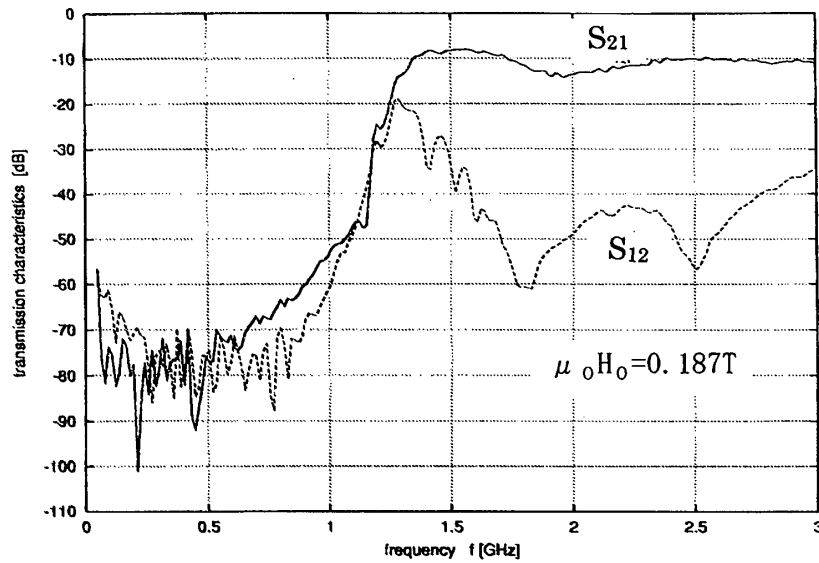


図 9 左手系動作により現れる非可逆性

図 9 は直流磁界の強さを 0.187 T と弱く選び、左手系線路の帯域に μ が負になる $f_h=2.8\text{GHz}$ と $f_0=4.65\text{GHz}$ の周波数帯域を重ねて、散乱パラメータを測定したものである。同図で、 S_{21} と S_{12} の違いによる非可逆性が 30dB 以上、帯域 1.5GHz に渡って現れる。このような特性は既に磁界の強い場合の図 6 に示す特性でも現れているが、この場合は、左手系特性からかなり離れた 5GHz である。この二つの非可逆性のメカニズムは界の偏りに関連する。すなわち、左手系による界の偏りは順方向 S_{21} ではスタブ側にあり、逆方向 S_{12} はスタブの無い側にあるものとする。これは順方向 S_{21} では容量負荷などにより伝搬し、 S_{12} は μ が負になることにより現れる漏洩現象により減衰するものとする[10]。

IV むすび

フェライト基板マイクロストリップ線路における左手系の伝送特性について理論的並びに実験的に考察した。理論については等価回路的手法に基づいて四端子定数並びに、散乱パラメータを求め、左手系の伝送特性を、後退波特性、磁界による同調性、そして非可逆性に重きを置いて明らかにした。一方、実験においては左手系の線路が YIG 多結晶基板に集中定数の容量、短絡スタブをストリップ線路に装荷した形で作成され、その実験が行われ、理論値と比較された。これらから左手系の特性にフェライト特有の磁気同調性が生じると共に、 μ が負の周波数帯域で非可逆性が現れることが分かった。特に非可逆性に関しては、新しい原理に基づくアイソレータが出来る可能性がある。しかしながら、現在のところ非可逆性は等価回路による現象的な説明であり、より厳密な取り扱いには回路シミュレータなどによる電磁界理論の結果[10]を待たねばならない。

謝辞、本研究は一部福井工業大学の特別研究費で行った。また、実験に関してお世話になった大阪工業大学の小寺敏郎講師ならびに京都工芸繊維大学の上田哲也博士に感謝の意を表す。

参考論文

- 1) R.A.Shelby,D.R.Smith and S.Schultz; "Experimental verification of a negative index of refraction", Science,pp.77-79(6April 2001).
- 2) Special Issue on Metamaterials,IEEE Trans.on AP,51,10(Nov.2003).
- 3) 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).
- 4) L.Liu,C.Caloz,C.C.Chang and T.Itoh;
"Forward coupling phenomena between artificial left handed transmission lines",
J.of Appl.Phys., vol.92,no.9,pp.5560-5565 (1Nov.2002).
- 5)C.Caloz and T.Itoh;
"Novel microwave devices and structures based on the transmission line approach of metamaterials",IMS Dig.,TU2C-3(June 2003).
- 6)堤 誠;"PBG 構造フェライトマイクロストリップ線路"、福井工業大学紀要,第 34 号, 2004.
- 7) 堤 誠;"周期構造フェライト導波路について—LHM 回路への提案— "、電気関係学会
北陸支部連合大会,C-40(平 15 年 9 月).
- 8) M.E..Hines;"Reciprocal and Nonreciprocal Modes of Propagation in Ferrite Strip Line and Microstrip Devices", IEEE Trans.on Microwave Theory and Tech.,vol.19,.no.5,pp.442-451 (May.1971).
- 9) S.Ramo,J.R.Whinnery,T.V.Duzer;
"Feield and Waves in Communication Electronics",John Wiley & Sons,(1965).
- 10)堤 誠、上田哲也;"フェライト基板マイクロストリップ左手系線路に見られる非可逆性 "、電子情報
通信学会論文誌,vol.J87C,2,pp.274-275(平成 1 6 年 2 月).

(平成 16 年 12 月 1 日受理)