様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成２１年４月２６日現在

研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2006-2008
課題番号：18560335
研究課題名（和文） マイクロ波帯における人工媒質中の電磁界解析とその新機能デバイス応用
研究課題名（英文） Analysis of Electromagnetic Field in Artificial Materials and its Application for Novel Microwave Devices

研究代表者
堀田 昌志（HOTTA MASASHI）
山口大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：70229201

研究成果の概要：
身の回りに存在する通常媒質の材料定数は一般に正の値を示すが，昨今高い注目を浴びているメタマテリアルの登場によって，負の材料定数を持つ媒質が非磁性・非電離状態下でも実現可能となった。本研究では，負の材料定数を示すメタマテリアル中において存在可能な電磁波の特徴について詳細に検討している。特に，これまで材料定数である誘電率又は透磁率のどちらか一方のみが負の値を持つ Single-Negative 媒質（以下では SN 媒質）では，伝搬電磁波が存在出来ないと考えられていたが，そのような媒質でも構成要素の構造を適切に設計し，材料異方性を制御すれば後進波特性を持つ伝搬電磁波が存在可能であることを明らかにしている。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
２００６年度	1,800,000	0	1,800,000
２００７年度	800,000	240,000	1,040,000
２００８年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総　計	3,400,000	480,000	3,880,000

研究分野：　工　学
科研費の分科・細目：　電気電子工学・電子デバイス・電子機器
キーワード：　マイクロ波・ミリ波工学，人工媒質，メタマテリアル，負材料定数

１．研究開始当初の背景

(1)　電磁波の波長に比べて十分に小さい微小構成要素に所望の誘導性や容量性を持たせ，それを物質の分子構造の様に周期的に配置した人工媒質(メタマテリアル；Metamaterial)が注目を浴び，世界各国で様々な研究開発が活発に行われはじめていた。

(2)　メタマテリアルでは，媒質の誘電率および透磁率を制御する事が可能で，両者が共に負である負屈折率（左手系）媒質（Negative Refractive Index Materialあるいは Left-Handed Material；以下，NRI媒質）が構成可能である。NRI媒質中では位相変化を表す波数ベクトルとエネルギー伝達を表すポインティングベクトルの方向が逆になると言った特異な電磁気学的性質から，全世界的に脚光を浴び，その新機能線路や新機能デバイス等への応用がなされてきた。

(3)　メタマテリアルにおいて，NRI媒質よりも先行して提唱されていた材料定数のどちらか一方のみが負となる人工媒質(Single-Negative Material；以下，SN媒質)では，波動伝搬は不可能であると考えられており，伝搬電磁波の詳細な解析例などは数少なく，その素子応用などに関する検討は未だ詳細には行われていなかった。

(4) 研究代表者は，SN媒質からなる半無限構造やスラブ構造について，その伝搬電磁波解析に着手し，以下のような成果を得ていた。

① 身の回りに存在する従来の材料は正の材料定数を持つDouble-Positive媒質(以下，DP媒質)である。
② DP媒質からなる半無限媒質境界には，理論的にMaxwellの方程式および境界条件を満足する解が存在せず，電磁波は存在出来ないものと考えられていた。
③ 半無限媒質境界を構成する片側の媒質がSN媒質であれば表面電磁波モードが存在出来る事を確認した。

２．研究の目的

(1) 媒質の材料定数のどちらか一方のみが負になる現象は，表面波プラズモンや磁性体内の静磁波と言った特別な条件下での波動でのみ観測されていたが，人工媒質の構成要素を適切に設計すれば，特別な条件下で無くとも SN 媒質が実現できる事が示されている。

(2) 実際に SN 媒質のデバイス応用を行う際には，以下に例示するような，より実用性の高い構造を持つ SN 媒質中における電磁波解析が不可欠と考えられる。

① SN 媒質からなるスラブ構造
② 導体で裏打ちされた SN 媒質スラブ構造
③ SN 媒質幅がテーパ状のるスラブ構造

(3) 上記以外にも実用に資する様な構造における電磁界解析の結果を総合的に吟味する事で，これまでに存在しなかったような革新的な性質を持つ新機能素子の実現に関する基礎的かつ実用的な検討を行う。

３．研究の方法

負の材料定数を持つ SN 媒質は，平面型マイクロ波回路の一種である Sprit-Ring Resonator（以下では SRR と呼ぶ）を微少セルの側面に形成したり，金属ワイヤやロール状二重金属円筒(以下では SRC と呼ぶ)を埋め込んだりした微小セルを物質の分子配列のように周期的に配列した人工媒質で実現可能である。本媒質では微小セル内での電荷の偏極現象，あるいは SRR や SRC の共振現象を利用するため，負の材料定数を示す周波数範囲がある限られた帯域に制限されてしまう。

(1) まず人工媒質の材料定数の周波数依存性（分散特性）に関する詳細な解析する。

① 負の材料定数の出現周波数帯域の解明
② NRI あるいは SN 媒質の性質を示す帯域の解明

(2) SN 媒質からなるスラブ構造における表面波モードについて，詳細なモード解析を行い，どの様な条件下でどの様な性質を持った表面波モードが存在出来るのかを確認する。

① 実用性を考慮し, SN 媒質を構成する実験的手法についても考慮する。
② 得られた研究成果は学会や学術雑誌等で発表し，外部からの意見等を参考にしながら効率よく研究を進める。

(3) 微小セルの構成方法によっては材料定数に異方性が表れる。

① 異方性を持つ SN 媒質についてもスラブ構造での固有モード解析を行う。解析では存在出来るモードを表面波モードに限定せず詳細に検討する。
② 伝搬モードの存在を確認できれば，モードの特徴・性質を詳細に検討する。例えば，モード内の電気的あるいは磁気的エネルギーの組成割合やスラブ厚さ変化に対する固有モードの分散特性の変化についても検討する。
③ 結果を総合的に検討し, SN 媒質内での特異な電磁波の振る舞いを明らかにする。
④ 得られた研究成果については学会や学術雑誌等で発表し，外部からの意見等を参考にしながら効率よく研究を進める。

４．研究成果

本研究では，誘電率或いは透磁率のどちらか一方が負の値をとる SN 媒質を取り扱っているが，負の透磁率を持つ媒質についてのみ説明する。なお，誘電率が負の場合は，電磁界の双対性を考慮すれば，その結果が容易に推察される。

(1) 等方性 SN 媒質からなるスラブ構造

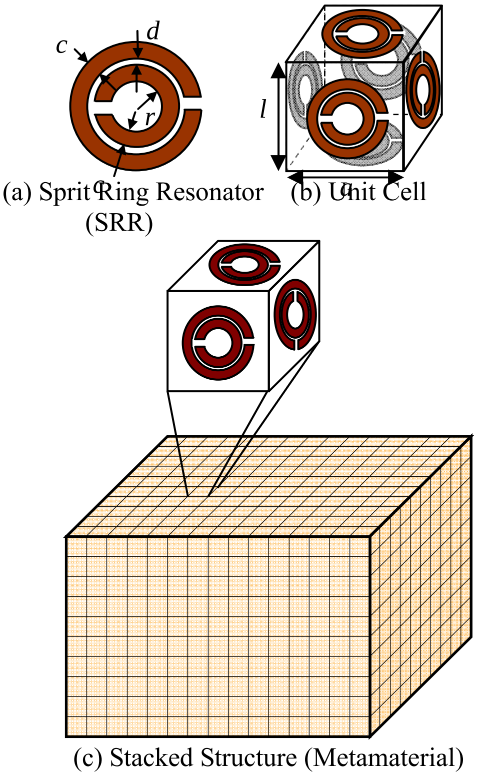
図 1(a)に示すような SRR を同図(b)の様に立方体の全面に配置したセルを単位構造とし，同図(c)の様に三次元的に周期配列すれば，等方性負透磁率を持つメタマテリアルが構成出来る。なお，単位セルの大きさ a および l は，以下で考察する電磁波の波長に比べて十分短いものとする。

ここで，SRR を構成する金属の抵抗損失が無いと仮定し，その形状パラメターを図 1 中の様に定義すれば，構成されるメタマテリアルが持つ材料定数は次式の様に表される。

$$\mu_r(\omega) = 1 - \frac{\pi r^2 / a^2}{1 - \left(3lc_0^2 \Big/ \pi\omega^2 \ln\frac{2c}{d} r^3 \right)} \qquad [1a]$$

$$\varepsilon_r = \left(1 - \frac{\pi r^2}{a^2}\right)^{-1} \qquad [1b]$$

但し，式中の c_0 は光速である。



$a = 5.0 \times 10^{-3} m, c = 5.0 \times 10^{-4} m, d = 5.0 \times 10^{-5} m$
$l = 5.0 \times 10^{-3} m, r = 1.0 \times 10^{-3} m$

図１ SRR型負透磁率メタマテリアル

式[1]からも分かる様に，このメタマテリアルの比透磁率は図２に示す様な周波数依存性（分散性）を持ち，13.50GHz から 13.92GHz 範囲で－1.0 以下となる。これに対し，比誘電率は SRR の形状パラメタのみで決定される値で正の値をとるので，この領域で本人工媒質は SN 媒質となる。

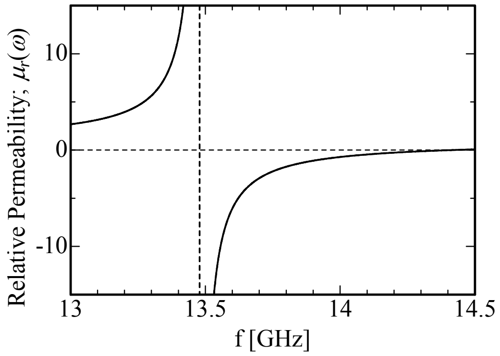


図 2　SRR からなるメタマテリアルの透磁率分散特性

まず，この様なメタマテリアルを用いて，図３に示すような有限厚さ T のスラブを構成した場合にスラブ内に存在可能なモードについて検討する。なお，スラブの上下は自由空間領域とする。

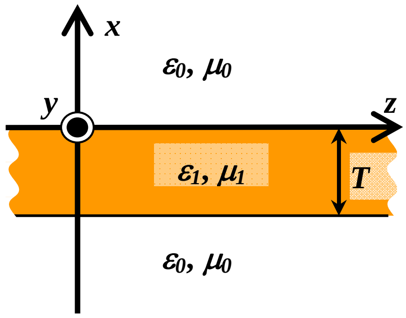


図3 等方性負透磁率を持つスラブ構造

各領域内において Maxwell の方程式を解き，スラブと自由空間の境界面における境界条件を適用すれば，次のような TE 表面波モードに対する固有値方程式が得られる。

$$(\mu_1\delta_0 - \mu_0\delta_1)^2 = (\mu_1\delta_0 + \mu_0\delta_1)^2 e^{-2\delta_1 T} \qquad [2]$$

なお，$\delta_0 = \sqrt{\beta^2 - \omega^2\varepsilon_0\mu_0}$ 及び $\delta_1 = \sqrt{\beta^2 + \omega^2\varepsilon_1\mu_1}$ である。また，解析過程に置いて負透磁率の SN 媒質では TM モードは存在出来ない事を確認している。

ここで周波数 13.6GHz におけるスラブ領域の材料定数は透磁率μ_1=－6.071μ_0 及び誘電率ε_1=1.144ε_0 を用いて式[2]の固有値方程式を解くと，図 4 の様なスラブ厚さ T に対する TE 表面波モードの伝搬定数の特性が得られる。なお，λ_0 は電磁波の自由空間波長であり，k_0 は自由空間波数である。

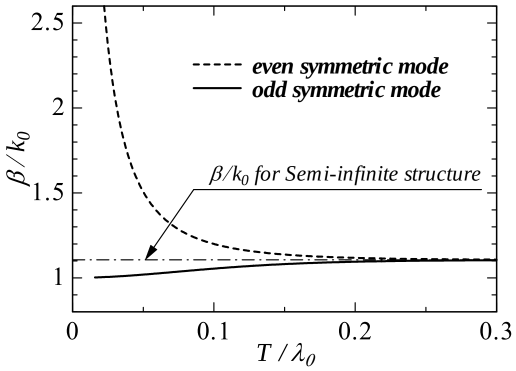


図4　表面波伝搬定数のスラブ厚さ依存性
($\varepsilon/\varepsilon_0$=1.144, μ/μ_0=－6.071 @13.6GHz)

同図より，２種類の表面波モードが存在し，両者はスラブ厚さが厚くなるに従って自由空間と負透磁率 SN 媒質境界における表面波モードの値に漸近していくことが分かる。次に，スラブ厚さを T=0.2λ_0 とした場合の両モードの縦磁界分布を求めると図 5 の様にスラブ中央面に対して，それぞれ奇対称および偶対称性を有する表面波モードであることが分かった。

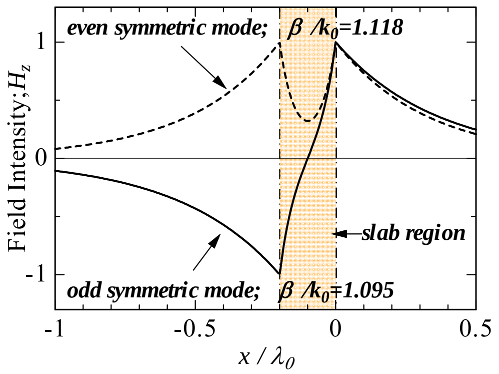
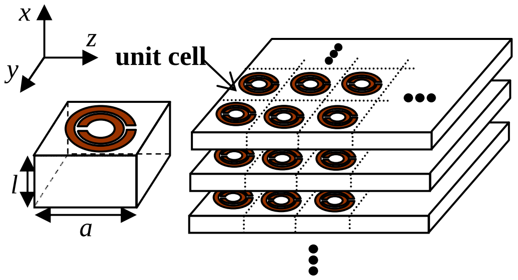


図5 表面波モードの縦磁界成分の分布
（スラブ厚さT/λ_0=0.2）

(2)　異方性 SN 媒質からなるスラブ構造

次に，図 6 に示すように立方体の特定の面のみに SRR を配置した構造体を単位セルとして集積させれば，構成されるメタマテリアルの材料定数は異方性を持ち，その比誘電率及び比透磁率は次式のようにテンソル量となる。



(a)Unit cell　　(b) Stacked Structure

$a = 5.0\times10^{-3}m, c = 5.0\times10^{-4}m, d = 5.0\times10^{-5}m$
$l = 1.0\times10^{-4}m, r = 1.0\times10^{-3}m$

図 6　異方性負透磁率を持つメタマテリアル

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix}, \quad \mu = \begin{pmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{pmatrix}. \qquad [3]$$

この様な異方性材料定数を持つメタマテリアルで構成された厚さ T のスラブ構造における電磁モードの固有値方程式は次の様になる。

$$\left(\mu_0^2\delta_1^2 - \mu_z^2\delta_0^2\right)\sin\delta_1 T = 2\mu_0\mu_z\delta_0\delta_1\cos\delta_1 T \qquad [4]$$

ここで，

$$\delta_0 = \sqrt{\beta^2 - \omega^2\varepsilon_0\mu_0}\,, \quad \delta_1 = \sqrt{\frac{\mu_z}{\mu_x}\left(\omega^2\varepsilon_y\mu_x - \beta^2\right)}$$

である。固有値方程式内の変数δ_0及びδ_1は平方根内に各テンソル成分が含まれた形をしており，成分の正負によって実数或いは虚数となる。そこで，比誘電率テンソルの各成分は全て正の値をとる負透磁率 SN 媒質を想定し，比透磁率テンソルの各成分の正負によってどの様な電磁モードが存在しうるかを検討した。その結果を表 1 に示す。同表から明らかな様に，比透磁率テンソルの x 成分が負，z 成分が正の値をとる場合スラブ内部には体積波モードが存在出来ることが分かる。

表 1　テンソル透磁率各成分の正負と存在可能なモードの種類

	μ_x	μ_y	μ_z	δ_1	
a)	+	±	−	Imag.	TE surface mode
b)	−	±	−	Imag.	TE surface mode
c)	−	±	+	Real	TE volume mode
d)	+	±	+	Real	Conventional TE volume mode

ここで図 6 に示すように SRR をセルの上面のみに配置すれば，その透磁率テンソルは x 方向成分のみが式[1]で示したような分散性を示し，負の値をとり得る。従って，この様な材料でスラブ構造を構築すれば異方性 SN スラブを構成出来る。この異方性 SN スラブにおける体積波モードの固有値をスラブ厚さ T=1.0，5.0 及び 10.0mm の場合についてそれぞれ式[4]を解くことで求めた結果を図 7, 9 及び 11 に示す。解析範囲は，等方性 SN 媒質の場合と同様に比透磁率テンソルの x 方向成分が-1.0 以下となる範囲とする。なお，図中には TE_5 モードまでしか示していないが，実際にはこれらよりも上位の高次モードも TE_5 モードと同様な特性を示すことは確認している。

まず，スラブ厚さが 1.0mm と非常に薄い場合（図 7）には TE 体積波モードの分散曲線は右肩下がりとなり，波動はエネルギーの伝搬方向と位相の変化方向が反転する後進波特性を示している。また，比透磁率テン

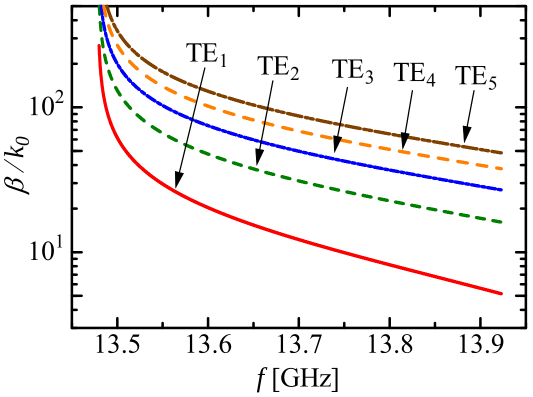


図 7　TE 体積波モードの分散特性
（@T=1.0mm）

ソルの x 成分の絶対値が大きくなる 13.5GHz 付近では固有値が極めて大きな値となると共に全てのモードが存在している事が分かる。ここで，周波数 13.6GHz における TE_1 及び TE_2 モードの横電界分布を図 8 に示す。同図を見て分かるように，電界はスラブ内部で正弦的に変化しており，求めた電磁波モードが体積波であることが確認出来る。

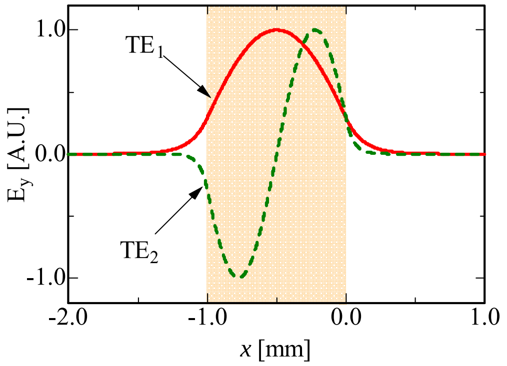


図 8　TE 体積波モードの電界分布
（T=1.0mm@13.6GHz）

次に，スラブ厚さが厚くなり 5.0mm となった場合（図 9）には，低次の TE_1 モードの分散曲線に湾曲が現れる。ここで，モードが持つ特徴は，湾曲部付近で図中の領域(i)及び(ii)と記している部分で大きく変化し，領域(i)では後進波，領域(ii)では前進波の特徴を示す。また，この湾曲部付近では同じモードであるにも関わらず固有値が違う前進波と後進波が存在する事になる。ここで，スラブ厚さ 5.0mm の場合についても周波数 13.60GHz における電界分布を求めると図 10 の様になった。
同図より，得られたモードが体積波モードである事が分かった。また，TE_1 モードに関しては，２つの固有値が存在するので，それぞれ，領域 i)の後進波領域の電磁界分布を TE_1-Backward，領域 ii)の前進波領域の電磁界

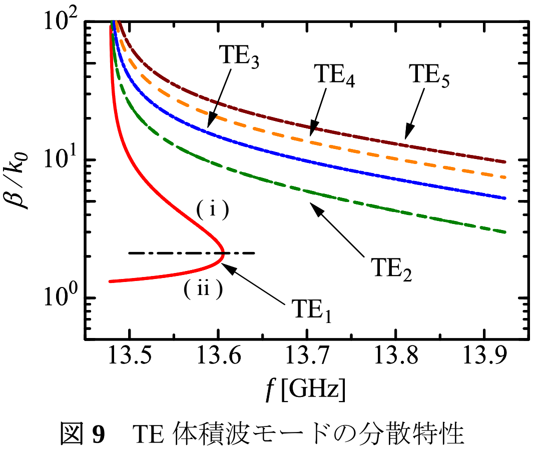


図 9　TE 体積波モードの分散特性
（@T=5.0mm）

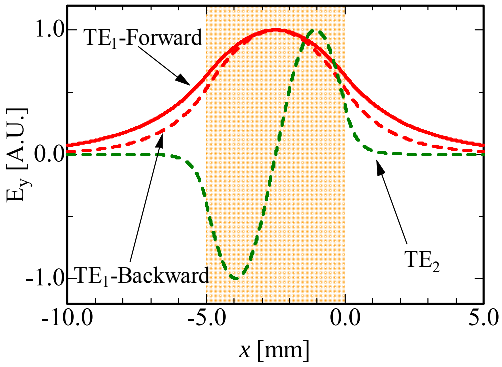


図 10　TE 体積波モードの電界分布
（T=5.0mm@13.6GHz）

分布を TE_1-Forward として示している。この結果より，前進波 TE_1 モードの方が後進波 TE_1 モードよりも電磁界がスラブの外側へと広がっていることが分かる。

更に，スラブ厚さをより厚く 10.0mm とした場合（図 11）には，最低次の TE_1 モードが比透磁率テンソルの x 成分が-1.0 以下とした解析領域から掃き出される様に図中から消失している。

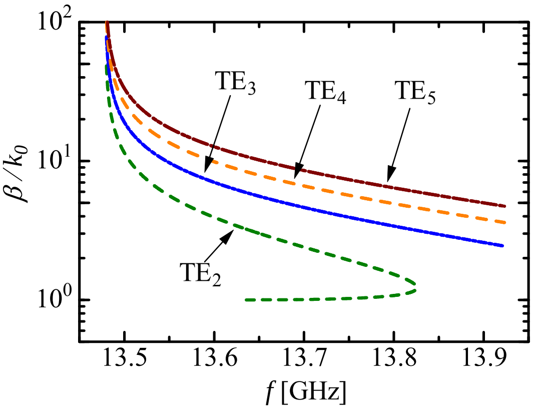


図 11　TE 体積波モードの分散特性
（@T=10.0mm）

ここで，スラブ厚さによって低次モードが解析領域から消失していく原因を探求するために，動作周波数 13.60GHz 一定としてスラブ厚さに対する各モードの固有値を求めた結果を図 12 に示す。同図より，各モードには解析範囲内に存在可能なスラブ幅の上限が存在する。例えば，TE_1 モードでは，5.0mm を超えた辺りが臨界スラブ厚さとなる。また，臨界スラブ厚さ以下の部分で，ある一定のスラブ厚さに着目すれば各モードの固有値は２つ存在することが分かり，この両者は臨界スラブ厚さに近づくにつれて近接してくる。これが，SN 媒質スラブの低次モード分散特性に湾曲を引き起こす原因であると考えられる。

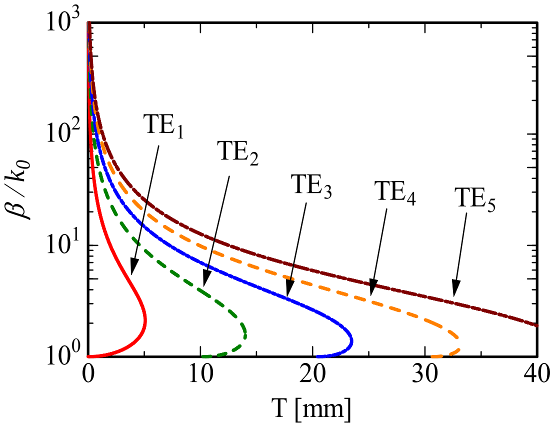


図 12 TE 体積波モードの固有値におけるスラブ厚さ依存性（@f=13.6GHz）

以上の結果より，透磁率テンソルの x 方向成分が分散性を持ち負の値をとる異方性 SN 媒質スラブの体積波モードは以下の特徴があることが分かった。

① 分散曲線の湾曲部が存在すれば, 同一周波数で複数の固有値を持つ。
② 分散曲線の湾曲部より下の領域に存在する固有値を除いた場合, 得られる波動は基本的に後進波の性質を持つ。
③ 分散曲線の湾曲部よりも下の領域での固有モードは前進波の特徴を持つ。
④ スラブ厚さが厚くなれば低次のモードから解析範囲で固有値を持たなくなる。

これらの性質は, 磁性体中における静磁波の特性と酷似している。今回取り扱ったメタマテリアルから成る SN 媒質では構成材料として磁性体を利用したり外部磁界を印加したりしていない。従って, 負透磁率を有する異方性 SN 媒質は非磁性材料で構成された人工磁性体として動作している可能性が高く，得られた体積波モードはその中を伝搬可能な疑似静磁波であると考えられる。

５．主な発表論文等
（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 4 件）

① M. Hotta, R. Ogawa, W. Murai, and M. Hano, “Modal Analysis for TE Volume Modes in Finite-Thickness Slab with Partly Negative Permeability Tensor Component,” Proceedings of 2008 Asia-Pacific Microwave Conference (Hong Kong, China), no.J6-1, pp.1-4, 2008-12, 査読有.
② M. Hotta, M. Hano, and I. Awai, “Modal Analysis of Finite-Thickness Slab with Single-Negative Tensor Material Parameters,” *IEICE Transactions on Electronics*, vol.E89-C, no.9, pp.1283-1290, 2006-09, 査読有.
http://repository.oai.yamaguchi-u.ac.jp/yunoca/contents/2008010026.pdf
③ M. Hotta, M. Hano, and I. Awai, “Modes in Single-Negative Slab with Tensor Material Parameters,” Proceedings of 2006 European Microwave Conference (Manchester, UK), no.EuMC54-1, pp.1007-1010, 2006-09, 査読有.
http://repository.oai.yamaguchi-u.ac.jp/yunoca/contents/2008010011.pdf
④ I. Awai, I. Matsuda, M. Hotta, A. Sanada, and H. Kubo, “Microwave applications of single negative materials,” *Journal of European Ceramic Society*, vol.26, no.10-11, pp.1811-1815, 2006, 査読有.

〔学会発表〕（計 5 件）

① 片山直樹, 宇根望, 河埜慎吾, 堀田昌志, 羽野光夫, “チャートを利用したメタマテリアルの材料定数推定法に関する一検討,” 第 10 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS)，no.C-19，pp.86-89, 2008.11.22-23, 広島市, 査読有.
http://repository.oai.yamaguchi-u.ac.jp/yunoca/contents/2009010002.pdf
② 村井渡, 堀田昌志, 小川良太, 羽野光夫, “厚い異方性 Single-Negative スラブ状媒質のモード解析,” 第 9 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS)，no.A-22，2007.11.24-25, 鳥取市, 査読有.
http://repository.oai.yamaguchi-u.ac.jp/yunoca/contents/2009010001.pdf
③ 宮原舞子, 堀田昌志, 粟井郁雄, “負定数媒質のパラメター抽出,” 電気関係学会関西支部連合大会，no.G7-16, p.G184, 2007.11.17-18, 神戸市, 査読無.
④ 村井渡, 堀田昌志, 小川良太, 羽野光夫, “導体接地された異方性 Single-Negative スラブ状媒質のモード解析” 電気・情報関連学会中国支部連大, no.11-09, p.498, 2007.10.20, 東広島市, 査読無.
⑤ 村井渡, 福山真三, 堀田昌志, 羽野光夫, 粟井郁雄, “異方性 Single-Negative スラブ状媒質中における体積モード,” 第 8 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS), pp.116-118, 2006.11.25-26, 広島市, 査読有.

６．研究組織
(1) 研究代表者

堀田　昌志（HOTTA MASASHI）
山口大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：70229201