

# マイクロ波・ミリ波新媒質の開発とデバイスへの応用

研究者代表 工学部 栗井 郁雄

## 研究の背景

21世紀を迎え高度情報化社会の到来が予想されている。昨年の流行り言葉ともなったIT革命はその推進者であり、いわゆるマルチメディアがその媒体であると考えられている。そのために情報通信技術が果たす役割は情報処理技術と両輪をなしており、更に詳しく言えば情報通信技術とは高周波通信技術に他ならない。そしてその中で現在最も脚光を浴びているものは、1つは光通信技術、もう1つは無線による移動通信技術である。後者は方式と装置に大別されるがハードウェアに当たる装置技術の中心はアンテナと回路である。我々が関係するのはこの回路技術であり、特にICに代表される半導体回路技術が牽引車の役割を果たしてきた。しかしそれ以外にも地味ながら回路技術を支えてきたものがある。その1つフィルターが我々のカバーする分野である。(図1参照)

フィルターとは多数の通信局が同時に通信を行なう時にそれらが混信しないようにチャンネルを切り分ける装置であり、使用周波数の違いでそれを行なう為にその方式はFDM(周波数多重)と呼ばれる。それに対してチャンネルの切り分けは周波数以外に時間及び符号によっても可能であ

り、TDM(時間多重)、CDM(符号多重)と呼ばれる方式も最近広く利用されている。FDMは他と比べて古い技術であり、電気通信の始まった頃(今から100年前)から使われているが、新材料の登場によって画期的な特性を持つフィルターが次々と出現し、FDMの高機能化が進められている。

新材料の代表は高温超伝導材であろう。1987年のYBCO(Yttrium Barium Copper Oxide)の発明以来多くの材料が合成され、現在これを含めてTBCCO(Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide)、BSCCO(Thallium Barium Calcium Copper Oxide)の3種が最も広く検討されている。利用形態としては発電、送電、蓄電などの電気エネルギー変換効率向上や磁気浮上、軸受けなどの交通・産業利用も考えられているが、最も実用に近いと言われているのは通信への応用である。通信に使う場合、低損失性に着目したフィルタ利用と超伝導電子の特異な振舞を利用するミクサ、トランジスターの開発がある。現在の所は前者が圧倒的に実用に近く、超伝導フィルターは移動通信基地局及び衛星通信衛星局において実用化テストの最終段階にある。

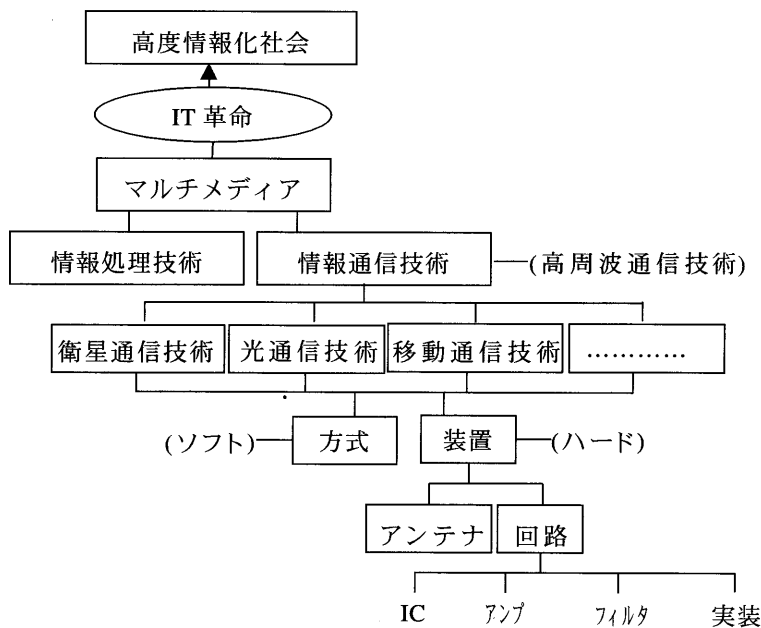


図1 我々の研究背景

一方マイクロ波人工媒質開発の歴史は古い。第2次世界大戦の頃図2に示すようなレンズアンテナという概念が提案され、波長に比べて十分小さい金属片を並べる事によって等価的な電気双極子を形成し、マクロに見て誘電体レンズを作る事が検討された。本物の誘電体を用いないのは重量軽減のためである。その後光学におけるキラル（旋光性）媒質の発想を電磁波領域に拡張するものとして、らせん形やオメガ形金属線を利用した媒質など無数の形式が提案されると共に理論も整備された。そのような媒質の構成関係式は次の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= [\epsilon] \mathbf{E} + [\zeta] \mathbf{H} \\ \mathbf{B} &= [\zeta] \mathbf{E} + [\mu] \mathbf{H} \end{aligned} \quad (1)$$

このように媒質の電磁気特性を表わすマクロな構成関係式は自然界に存在する媒質を含みつつ最も一般性高く拡張され双異方性（Bianisotropic）媒質と呼ばれる。各係数はテンソル（ダイアディック）であり、周波数依存性を持つ。この分野は理論電磁気学の一分科として認知されているが、実用化への関心より理論的関心の強い研究者を多く擁している。従って我々のようなマイクロ波回路研究者の参入は当該分野の活性化に役立つものと思われる。

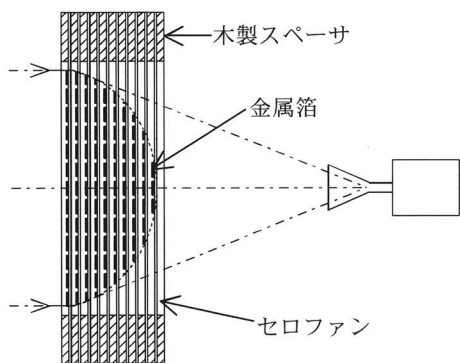


図2 レンズアンテナ

### 関連技術の現状

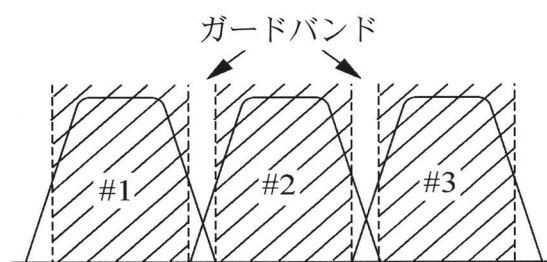
#### 1. マイクロ波高温超伝導フィルタの開発の現状

##### (1) その必要性

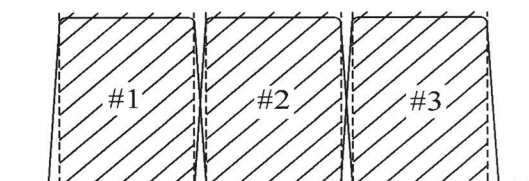
通信需要の急激な増大により周波数資源の逼迫が叫ばれており、新しい通信帯域の開拓や使用周波数帯の入れ換えなど様々な工夫がなされているが、有限な帯域を効率良く使う事も大きな技術

的課題である。複数の通信チャンネルを隣接して使う場合、他のチャンネルを通さないフィルターを使用する事が不可欠であるがその通過特性が図3 (a)のようにゆるやかであると各チャンネル間にガードバンドと呼ばれる広い緩衝帯域を設ける必要があり無駄が多い。それに対して(b)のように急峻な特性のフィルターを用いればガードバンドを極小化する事ができて有効な周波数利用を期待する事ができる。この要請はあらゆる通信に対して共通であるが特に移動通信の極端な契約数の増加ペースに対応するために無駄減らしの手法が有効である。さて図3のようなフィルターは帯域通過フィルター（BPF）と呼ばれ図4の様に共振器を並べる事によって作製される。この様にすると共振周波数近傍の信号のみが共振器間を渡り終える事ができ、入力端から出力端へと出て行く事ができる。共振器の個数を増やすにつれ図3の(a)のような特性から(b)のようなより急峻な特性へと移行するので上記のような周波数有効利用のためには多段共振器BPFの開発が不可欠である。

しかし共振器には通常損失があり、当然多数個使用するほど全損失は増大する。仮に1個あたり10%の電力損失があったとすれば8個の共振器で信号は元の1/2以下になってしまう。損失分は増幅すれば元に戻るだろうと考える向きもあろうが、受信機の先端で損失のため信号レベルが下がった場合増幅しても雑音と同時に増幅されてしまい何もならない。そこで1個あたりの損失が極めて小



(a)ゆるやかなフィルターによる無駄の多い周波数利用



(b)急峻なフィルターによる有効な周波数利用

図3 フィルターによるチャンネルの切り分け

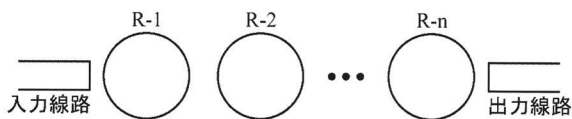


図4 BPFの構成原理

さな超伝導共振器を用いる事の意味が大きくなる。図5にマイクロ波帯における銅と高温超伝導体の表面抵抗の比較を示す。この $R_s$ の値は直接共振器の損失に比例する。図5によると10GHz近傍でも超伝導体の $R_s$ は銅の1/100程度となるので、例えば前例のように1個あたり銅共振器の損失が10%であるならば超伝導共振器は0.1%であって全く無視できるような大きさである。図6に一例として高温超伝導体で作製された32段BPFの特性を示す。素晴らしい帯域外特性と帯域内の超低損失を兼ね備えたフィルターである事がわかる。

上述のBPF以外にBEFと略称されるフィルターも重要である。これは帯域除去フィルター(Band elimination filter)と呼ばれBPFとは正反対に不要な信号成分を選択的に排除するものである。その構成原理は図7の如くであり線路途中に共振器を多数個配列しておく。各共振器の共振周波数を同一に設定すると共振時に各々が短絡状態となり信号の通過を妨げる効果を持つ。このフィルターはBPFと共に用いてその働きを補完する役割を与えられている。

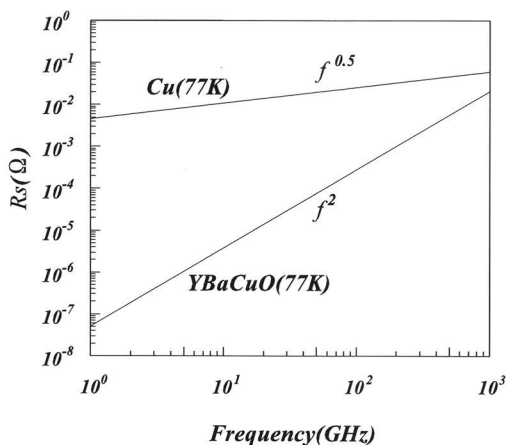


図5 銅とYBCOの表面抵抗の比較

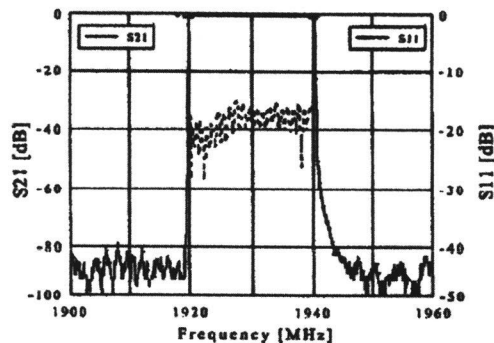


図6 高温伝導フィルターの1例

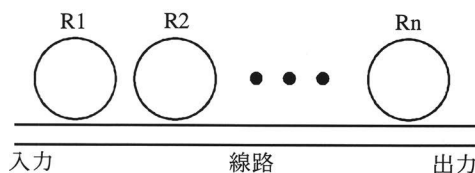


図7 BEFの構成原理

(2)技術的課題

高温超伝導フィルターの低損失性は確認されたがそれだけで通信システムにおいて実用されるわけではない。実用のためには次のような様々な課題を克服する必要がある。

<大電力/低歪特性の実現>

マイクロ波通信機中のフィルターの重要な用途の1つにデュプレクサーがある。これは図8のように1本のアンテナを送受信兼用として用いるために送受に対して別々の周波数を用い、2つのBPFを利用して信号の切り換えを行う装置である。従って受信機用には低レベル、送信機用に高レベルの信号を扱う事になり、大電力が通過する時に生じ易い非線形歪の低減が大きな課題となる。そのために特に結晶性の良い薄膜作製法を開発したり、電力集中の起こりにくい回路パターン工夫を導入したりする。

<小形化>

携帯電話の移動局は現在胸ポケットに収納でき60g以下を実現しているが、これに超伝導を維持するための低温装置(クライオスタット)を加えて高機能化するという方向は考えられない。従って移動通信への超伝導応用は基地局装置に限られる。クライオスタットの小型化は着実に進みつつあるが、結局冷却すべき対象が小さいほどその体積・重量も小さくなるので基地局といえども回路の小型化は至上命令である。

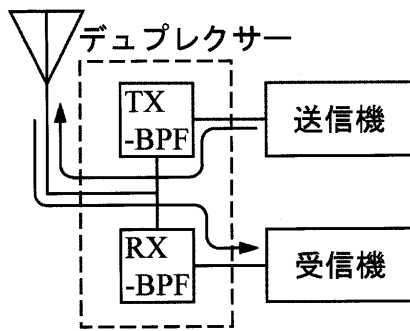


図8 デュプレクサ

小形化の最も効率的な方法は回路の集中定数化である。この原則に従ってこれまで多くの回路方式の提案があったが我々もこの線上で後述のような新しい方式の提案を行なった。しかし小形化すれば必然的に大電力特性は悪化するので小形フィルタはデュプレクサではなく受信機用チャンネルフィルタに用いる事になる。

<高信頼化>

あらゆる装置に対して要求される特性であるがMTBF (Mean time between failure) が一定以上の値を持つ事は実用化の必須条件である。超伝導フィルタにおけるMTBFの鍵を握るものはクライオスタットである。従来ピストンを含む可動部分を持っていたため数千時間などという低い値を示していたが、最近のクライオスタットはガス方式となり可動部を持たないためMTBFは数万時間を超え実用化の可能性が高まっている。

2 マイクロ波人工媒質開発の現状

前述のようにこの研究分野は極めて理論偏重である。昨年9月に筆者はBIANISOTROPICS-2000 (2000年度双異性媒質国際会議) という会合に出席し実験結果について発表した。他の発表は殆ど理論であり筆者の発表に対する関心も低かった。合計93件の発表のうち図面も表もないもの(純粋な理論) 46件、数値計算結果のついたもの35件、実験結果のあるもの12件という内訳であった。因みに、筆者が関係する電子情報通信学会の2000年度総合全国大会においてマイクロ波受動回路素子部門発表件数62件のうち上の分類による発表件数は夫々1件、27件、34件であり全く逆の傾向である事がわかる。

さて双異性媒質とは式(1)のような電磁気特性を持つ媒質であるが、それを実現するためのミクロな人工粒子としてどのようなものを選び、どのように配列するかという問題が最も重要である。その候補

として従来提案され実験されたものをまとめると図9のようになる。我々が提案している (h) のみが金属以外の媒質 (フェライト) を用いているが他は全て金属のみで単位粒子を構成している。これらの寸法を、考えている電磁波の波長よりも十分小さく作り、それを多数並べる事によってマクロに見た時に電気/磁気ダイポールとして振舞わせる。(e)、(f)は2つの電気ダイポールが結合する構造であるが他は電気及び磁気ダイポールが相互に結合する構造となっている。

図10に図9(a)を多数並べて双異性媒質を形成した例を示す。用いられているらせんはすべて右巻きであり対称中心を持たない構造であるため、この媒質に入射した電磁波は偏波面を右方向に回転させる。このような媒質は19世紀から光学において知られており、キラル媒質と呼ばれてきた。

図9の各種単位粒子を用いるとキラル以外にも様々な特性を実現できる可能性があるが、前述のように具体的な課題はあまり熱心に取り上げられず、抽象的な議論が先行している。しかしその中から実験結果を拾い上げてみると、これまでアンテナから放射した平面波を媒質に当てる実験、及び導波管中に媒質を挿入して通過・反射特性を測定する実験が行なわれている。その結果は全て共通点があり、個々の単位粒子の共振周波数の近傍で $\epsilon$ 又は $\mu$ が発散しかけるが吸収の増大を伴う事によって有限値に収まるというパターンである。又キラル性についても共振周波数近傍で大きくなるという特質は同じである。

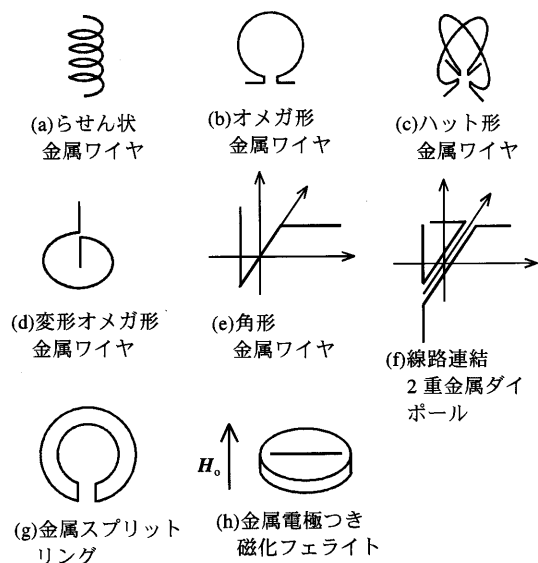


図9 双異性媒質を構成する単位素子

以上の様にこれまで実証された人工双異方性媒質の電磁気学的特性はあまり豊かとは言えない。従ってこの研究における課題は次のようにまとめ事ができよう。

- (1)新しい単位粒子の開発により新しい電磁気特性を合成する。
- (2)双異方性の効果を大きくする。
- (3)構成関係式の決定法を確立し、双異方性媒質によって作られた回路素子の特性を算出できるようにする。

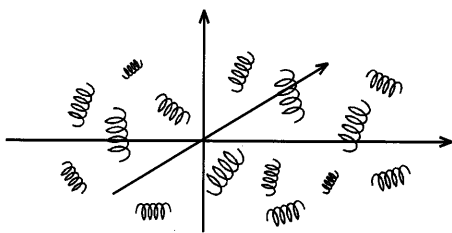


図10 双異方性媒質の一例としてのキラル媒質

### 研究の目的

図11(a)に示すように我々の計画初期の段階では高温超伝導膜の安価で簡便な作製法を自ら開発する意気込みであったが、専門性のずれは否めず、何年試みても満足のいく特性には至らないため、ついに昨年度より方針変更を行った。すなわち図11(b)のように膜作りは既知の方法に従う事にして研究目的から外しその膜を使ったフィルタ回路の開発に重点を置く事とした。一方材料開発のもう一つの計画として人工的な双異方性媒質を合成するというプロジェクトを並列にしていたが、新しい超伝導膜の作製法開発を目的から外すと共に、フィルタと人工媒質の関連は電磁気学的手法という点に集約されてきた。我々の得意とする研究手法をもとに計画を進めるといふ方針が明確になったわけである。

今年度は図11(b)の方針のもとに主として超伝導用のフィルタ方式開発と人工的双異方性媒質の実現に向けて努力したが、当然その媒質の応用目的を探る必要があり、我々はそれをマイクロ波回路素子に絞り可能性を検討した。その結果図11(c)に示すようにそれは共振器とする事が最も現実的であろうとの結論に達した。共振器は図4及び7に示されているようにBPF、BEFの基本構成素子であり最初に述べた如く、情報化社会実現に寄与する所が大きいと考えられるからである。

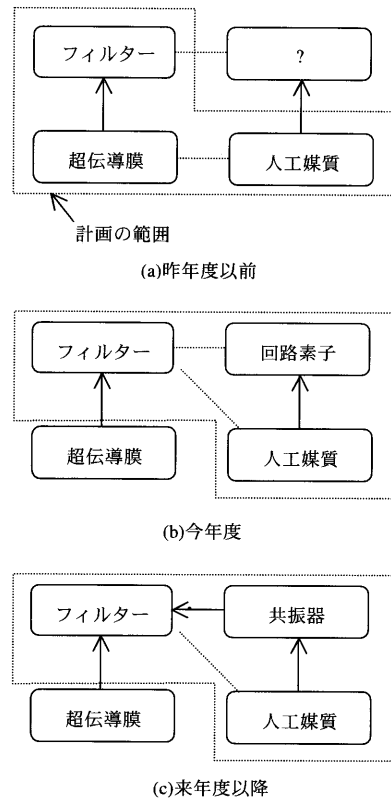


図11 研究目的の変遷

### 研究成果

#### 1. メアンダーライン型並列共振器を用いた高温超伝導コプレーナ線路型BPF の設計

##### 1.1 メアンダーライン型並列共振器

高温超伝導膜を用いた集中定数型回路としてメアンダーライン(Meander Line)形並列共振器を考案し、それを用いたBPFを設計した。BPFの設計はある条件の下でこれまで広く行われているinsertion-loss methodによる設計理論に帰着することができる。

図12(a)に本研究で提案したメアンダーライン構造の共振器を示す。接地の実現が容易なCPW(Coplanar waveguide)の特徴を活かして共振器の一端を接地とした約4分の1波長の共振器を用いることで2分の1波長共振器に比べて約半分小型化ができ、またこれをメアンダーライン状に折り曲げることでさらなる小型化を実現している。

メアンダー線路は折り曲げることによる線間の容量および不連続部分に接地に対する寄生容量を持つが、これを一端接地の並列共振器として用いる場合にはこれらの容量は全て接地に対する容量と見なすことができる。このためこの並列共振器の等価回路は図12(b)の様な、線路の持つインダクタンス $L_m$ お

よび接地に対する容量の和 $C_m (= C_{m,se} + C_{m,sh})$ の単純な集中定数並列共振器として表す事ができる。

但し、 $C_{m,se}$ は線路間に発生するキャパシタンス、 $C_{m,sh}$ は対接地間に発生するキャパシタンスである。

図12のメアンダーライン形並列共振器の等価回路パラメータは理論的に求めることは困難であるため電磁界シミュレータにより決定した。共振器から距離だけ離れた点を入出力ポートとして、この回路の散乱行列を電磁界シミュレータにより求め、その散乱行列から回路素子値を算出した。回路の両端に接続される回路を見たインピーダンスがハイインピーダンスであるという条件の下では、これを更に線路長 $l$ を取り除いたLC並列共振器として表すことができる(図12(c))。

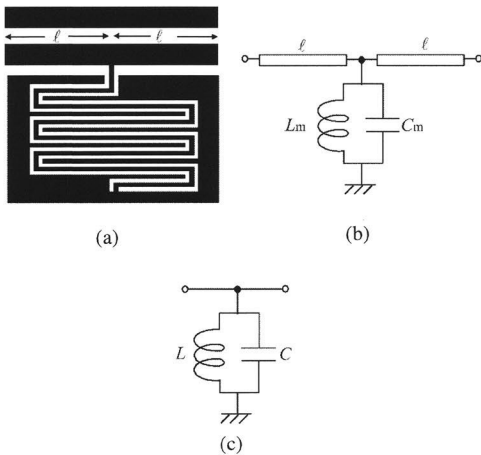


図12 メアンダーライン型並列共振

1.2 BPFの設計理論

図12(c)で表されたメアンダーライン形並列共振器を用いてBPFの設計を行った。Insertion-Loss Methodにより決定された低域原形フィルタにインピーダンス変換および周波数変換を施し、さらにJインバータを用いて全ての共振器を同一の並列共振器に変換することで図13の等価回路で表されるBPFを得ることができる。並列共振器が図12(c)のように $L$ および $C$ で表される場合、Jインバータの $J$ 値は次式で与えられる。

$$J_{01} = \sqrt{\frac{\omega_0 W C_{r1} G_A}{g_0 g_1}} \quad (2)$$

$$J_{n,n+1} = \sqrt{\frac{\omega_0 W C_{rn} G_B}{g_n g_{n+1}}} \quad (3)$$

$$J_{i,i+1} = \omega_0 W \sqrt{\frac{C_{ri} C_{r(i+1)}}{g_i g_{i+1}}} \quad (4)$$

$\omega_0$ 、 $w$ 、 $G_A$ 、 $G_B$ はそれぞれ中心周波数、比帯域、電源コンダクタンス、負荷コンダクタンスを表す。

Jインバータはそれぞれ図14(a)又は(b)の様なギャップ又はインターディジタル構造により実現することができる。同図(b)のギャップ構造は(a)のインターディジタル構造に比べて中心導体の対向面積が大きいので、より大きな $J$ 値を得ることができる。両者の構造は設計に必要な $J$ 値の大きさによって選択すればよい。これらの回路パラメータを算出するため計算機シミュレータによる電磁界解析を行った。図15および16にそれぞれの構造と $J$ 値および線路長 $\phi$ の関係を示す。同図を用いて、設計に必要な $J$ 値が与えられたとき、ギャップ型あるいはインターディジタル型構造Jインバータの構造パラメータ $d$ あるいは $d_g$ が決定できる。

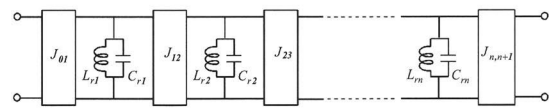


図13 BPFの等価回路

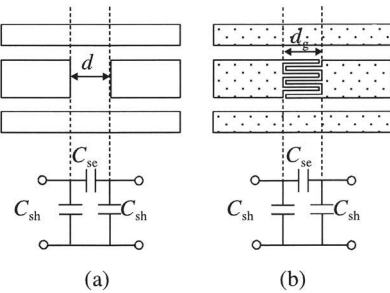


図14 Jインバータ

(a)ギャップ構造 (b)インターディジタル構造

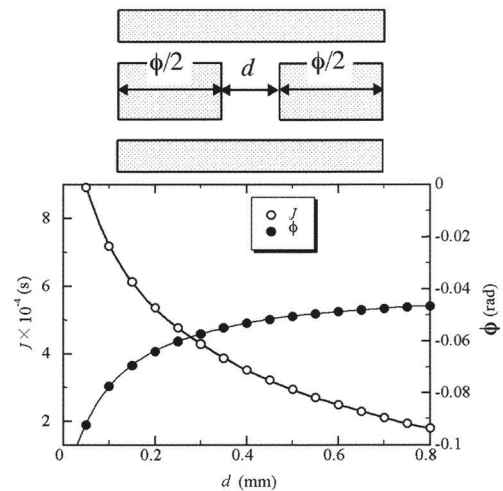


図15 ギャップ構造Jインバータの電磁界解析結果

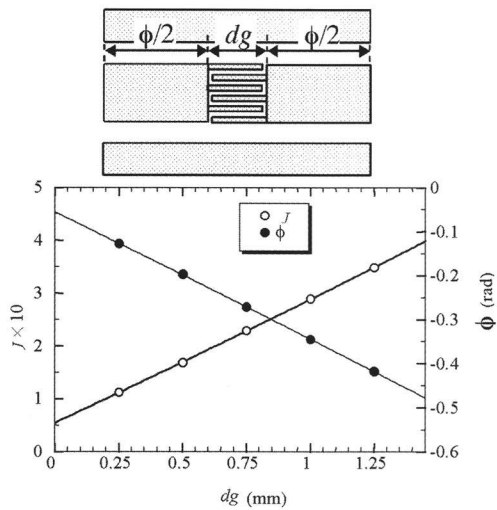


図16 インターデジタル構造Jインバータの電磁界解析結果

### 1.3 設計例

本設計理論の妥当性を示すため、まず基本となる2段バターワース型BPFの設計例を紹介する。また、本設計が多段BPFにも対応し得ることを示すため12段チェビシェフ型BPFの設計例を併せて示す。この内容は山口TLOを通して特許化を進めている。

#### <2段バターワース型BPF>

中心周波数1.358GHz、帯域40.74MHz（比帯域3%）の2段バターワース型BPFの設計を行った。電磁界シミュレータにより $l=3.238\text{mm}$ の場合、並列共振器の素子値 $L$ および $C$ の値はそれぞれ $L=9.230\text{nH}$ 、 $C=1.489\text{pF}$ を得た。

JインバータのJ値は式(2)~(4)により $J_{01}=J_{23}=2.321 \times 10^{-3}$ 、 $J_{12}=0.269 \times 10^{-3}$ となるため、 $J_{01}$ の実現にはインターデジタル構造を、 $J_{12}$ の実現にはギャップ構造を採用した。図15および図16の関係からJインバータの構造は $d_g=0.759\text{mm}$ 、 $d=0.547\text{mm}$ を得た。このようにして得られた回路パターンを図17に示す。

この回路の動作を確認するため、図17の回路に対して電磁界シミュレーションを行った。その結果を図18に示す。図中の $S_{21}$ は回路の通過特性を、 $S_{11}$ は

入力ポートにおける反射特性を示す。同図には設計時に与えた回路素子値を用いて回路解析によって求めた理論特性を合わせて示したが、両者は共に一致しかつ設計仕様を満足しており、本設計法の妥当性が確認できた。

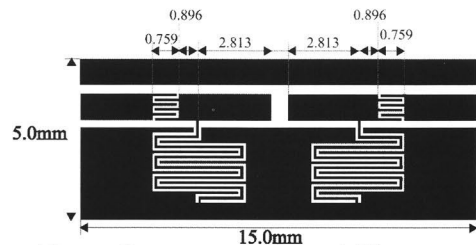


図17 2段バターワース型BPFの回路パターン

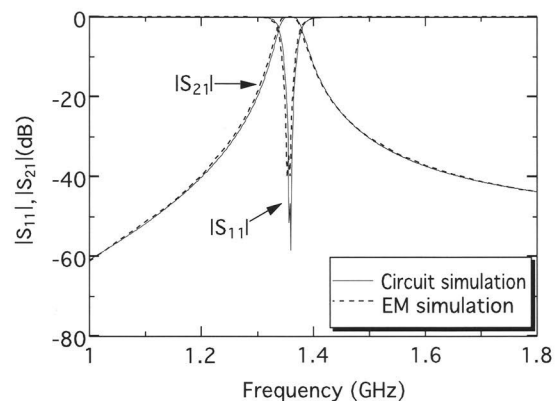


図18 2段バターワース型BPFの周波数特性

#### <12段チェビシェフ型BPF>

多段化BPFの設計例として12段チェビシェフ型BPFの設計を行った。

中心周波数を1.358GHz、帯域を40.74MHz（比帯域3%）とし、前節の2段バターワース型BPFの設計の際に用いた並列共振素子を用いて12段チェビシェフ形BPFを構成した。各JインバータのJ値は式(1)~(3)により求めた。

また2段バターワース型BPFの設計の際と同様に入出力側のJインバータにはインターデジタル構造を、 $J_{12}$ の実現にはギャップ構造を採用した。得られた回路パターンを図19に示す。

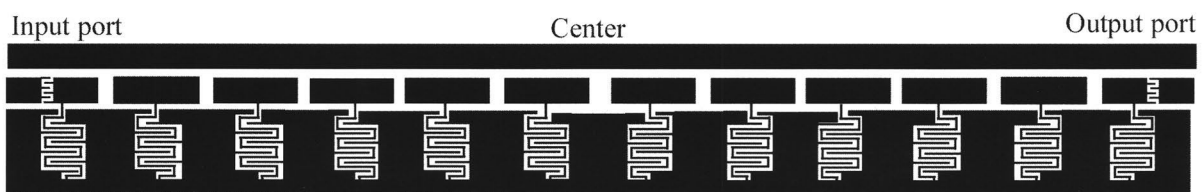


図19 12段チェビシェフ型BPFの回路パターン



図20 にその回路シミュレータによる周波数特性の計算結果を示したが、この計算結果は設計仕様をほぼ満足しており、本設計理論の妥当性が示されると同時に今回提案した方式のBPFが12段程度の多段化にも対応しうることが確認された。

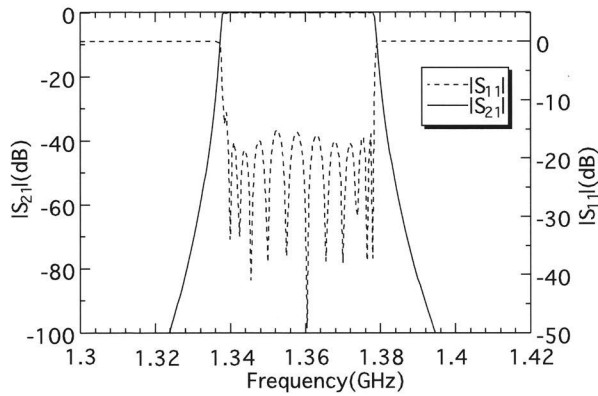


図20 12段チェビシェフ型BPFの伝送特

## 2. ストリップライン形共振器を用いた2段コムラインBEFの設計

ストリップライン構造は前述のコプレーナ構造とは異なり基板の両側に導体膜を必要とするので超伝導フィルタに採用されることは少ない(図21)。しかし我々の採用しているMOD法によれば両面に超伝導膜を作ることは容易である。我々は図22のような2段1/4波長共振器を用いたBEFを小型化する方法を検討した。まず図22(a)の標準的な回路から出発すると2つの共振器間のスペースが無駄と思われるのでそれを(b)のように詰めることを考える。その時2つの共振器間に補償コンデンサーを加えた。これが第1の特許申請である。このようにしてもまだ上部に折り曲げた線路が存在して基板面積を占有している。そこでこの線路部をL、Cの集中定数素子で置き換えるのが第2の特許申請であり(c)のように極めて大幅な小型化に成功した。上記に対する回路の通過特性のシミュレーション結果は図23(a)~(c)に示されており、マイクロストリップラインを用いた試作実験によっても動作確認を行った。

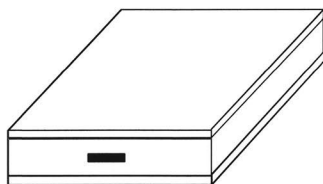


図21 ストリップ線路

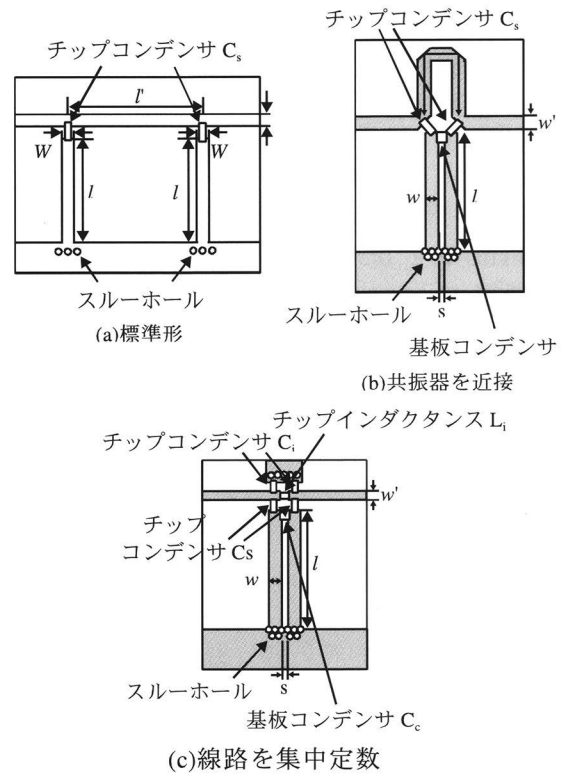


図22 ストリップライン形2段コムラインBEFの回路図

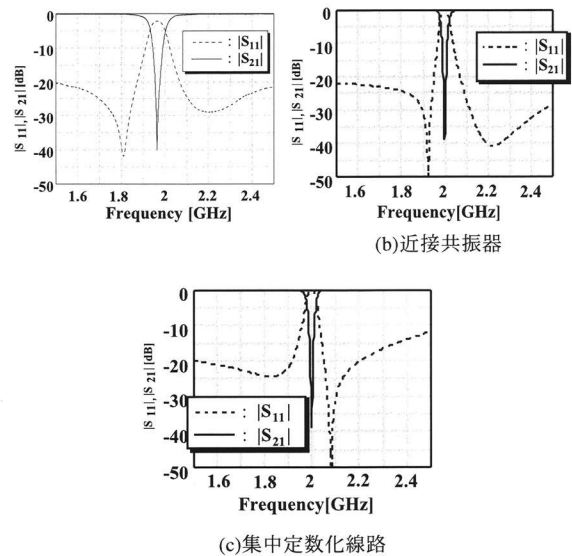


図23 ストリップライン形2段コムラインBEFのシミュレーション結果



### 3. 高温超伝導膜の作製

MOD法によるYBCO膜の作製工程を図24に示す。この方法によって作製したYBCO膜は臨界電流密度が $10\text{MA}/\text{cm}^2$ を越える事が最近報告され注目を浴びており、我々もそれに従って良質の膜作りを目指す。出発原料として酢酸イットリウム (Y), 酢酸バリウム (Ba) および酢酸銅 (Cu) を用い、これらの原料が 1:2:3 となるように酢酸 Y を 0.3381g, 酢酸 Ba を 0.51084g および酢酸 Cu を 0.59895g を純水に溶解し、酢酸基に対して等モル量のトリフルオロ酢酸溶液 (TFA) を混合した。その後、得られた溶液の不純物 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) を取り除くために蒸留固化し、得られた青色のゲルをメタノール中に溶解させコーティング溶液を得た。更に得られたコーティング溶液は、ゲル中に溶媒を内装させる精製を数回行い (Solvent-Into-Gel : SIG法), そのゲルをメタノール中に溶解させ高純度コーティング溶液を得た。この際、出発溶液の不純物 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) の濃度が高いと、塗布時に基板上で液はじきが起こり、焼結の際に剥離および亀裂の原因になってしまう。このようにして得られたコーティング溶液を単結晶  $\text{LaAlO}_3$  上で回転速度 4000rpm, 60秒 の条件下でのスピコートを行うことによりゲル膜を得た。次にゲル膜に対し加湿の酸素雰囲気下  $400^\circ\text{C}$  で熱処理を行い、その後加湿の酸素混合窒素 ( $\text{O}_2 : \text{N}_2 = 0.1 : 99$ ) および乾燥の酸素下  $800^\circ\text{C}$  で熱処理することにより YBCO 膜を得た。作製した YBCO 膜に対して X 線回折実験を行った。図 25 にその結果を示す。同図において、●で示したピークが YBCO 相であり、(001)<sub>LA</sub> が単結晶  $\text{LaAlO}_3$  基板のピークである。同図より c 軸に配向した YBCO 相が確認できた。

また、得られたYBCO膜に対して誘電体共振器法により膜の高周波表面抵抗 $R_s$ 値の測定を行ったが、 $R_s$ の高さから誘電体共振器自体のQ値の存在を確認できず $R_s$ の実測には到らなかった。膜を顕微鏡で観察すると膜表面に亀裂が見られたため、 $R_s$ が測定できなかった原因はコーティング溶液の不純物濃度がまだ高くYBCO結晶が均一に成長ができていないためと考えられる。コーティング溶液の高純度作製条件および純度検査を確立は今後の課題となった。

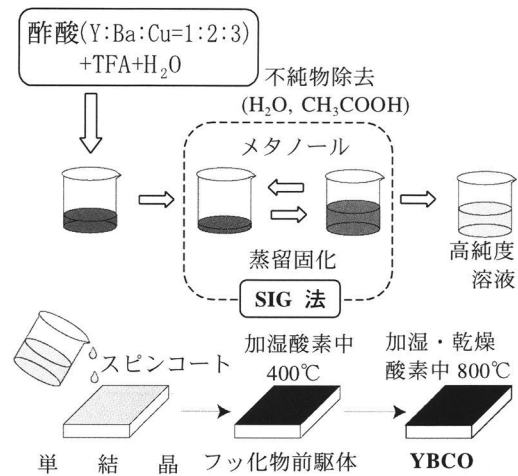


図24 MOD法を用いたYBCO膜プロセス

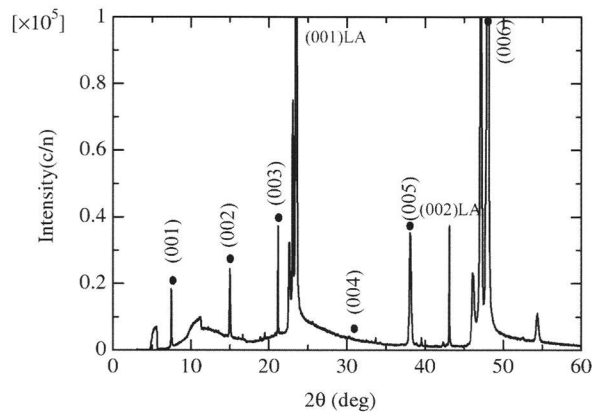


図25 X線回折

### 4. 双異方性媒質の作製

#### 4.1 単位粒子

我々の提案する双異方性媒質の単位粒子は前述のように図9 (h)のような構造を持っている、これはワイヤによってできる電気ダイポールとフェライトの磁気ダイポルを結合させる所がポイントである。従来の単位粒子との根本的な違いは磁気ダイポールが電磁誘導によって誘起されるのではなく最初から存在している点である。従って2つのダイポールの結合がマクスウェルの方程式に支配されず、それとは独立であるためマクロに見た時の構成関係式が局所的に定義可能となる。これは自然に存在する電磁氣的媒質のすべてに当てはまる特性であり、人工的な双異方性媒質が「媒質」として利用するための必要条件であると我々は考えている。それに対して図9 (h)以外の単位粒子を用いると構成関係式が波数の関数となり、「媒質」の性質

そのものが周りの境界条件の影響を受ける事になるため、閉じた空間にこの媒質を挿入したデバイスの設計が不可能となってしまふ。

単位粒子はそれ自身の損失ができるだけ小さい事が必要である。さもなくば、合成された双異方性媒質も極めて吸収性となるからである。従って使用するフェライトとしてYIG (Yttrium Iron Garnet)単結晶薄膜を選び2~5mmの円形及び方形に整形した。その構造は、図26のようにGGG (Gadolinium Galium Garnet)基板をふくみYIG部の厚さは $100\mu m$ である。飽和磁化 $4\pi M_s$ は1780G、磁気共鳴半値幅 $\Delta H$ は0.8Oeである。この素材は非常に高価であるため同じものを多数作製することはせずに単位粒子の特性を調べるためだけに用いた。

一方、多くの粒子を並べて双異方性媒質を作るためには図27に示す安価な多結晶YIGを用いた。しかし、 $\Delta H$ が50Oeと大きく非常に吸収性が高い。この点が合成した双異方性媒質の基本特性にどう影響するかは不明であり、今後解明すべき課題である。

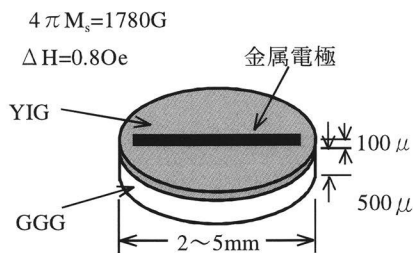


図26 単結晶YIG単位粒子

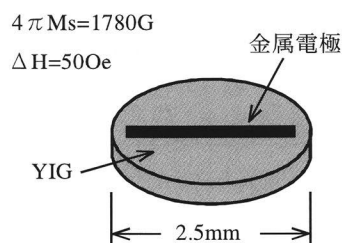


図27 多結晶YIG単位粒子

#### 4.2 基本特性

最も重要な点は磁気-電気相互作用の確認である。それは図28のような方形導波管共振器内に試料を入れることによって行なった。この結果は既に昨年度報告書に記載してあるので要点だけを述べる。P1は電界最大磁界最小の位置であるが電極がy軸即ち電界の方向に平行な時は

共鳴吸収が起り、垂直に配置した時及び取り去った時共鳴吸収は起こらなかった。以上により我々の単位粒子における磁気-電気相互作用の存在は証明された。

本年度は各種電極形状及びYIG形状に対して上記の事実を確かめた他、新しい奇妙な現象を見出した。それは電極をつけないYIG単位粒子を図28とは直交方向に、即ちYIG面がy方向を向くよう配置し、直流磁場もy方向に変更した時に生じた(図29)。導波管共振器は図28とは異なり $TE_{102}$ モードで共振するように設定したのでその電磁界分布は図29のようになる。その中で単位粒子を縦方向に移動し、P1~P3における共鳴吸収特性は図30のようになった。極めて規則的なスペクトルが見られると共に、磁界最大点から最小点への移動につれて別種の新しいグループに属するスペクトルが発生し、最小点では両者は共存していることがわかる。P3においては磁界最小であるから従来の理論に従えば全く共鳴は起こらないはずである。共同研究者のカメネツキー博士はこれを説明するため新しいモデルを提案しているが当グループ内においても未だ合意に達していないため討論を続けている。

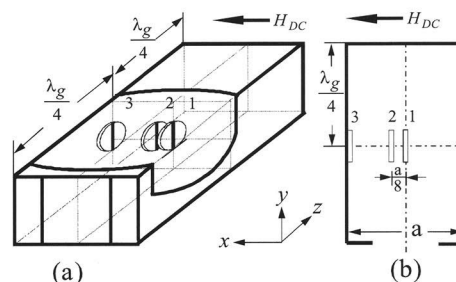


図28 磁気-電気相互作用確認実験 (TE<sub>101</sub>導波管共振器)

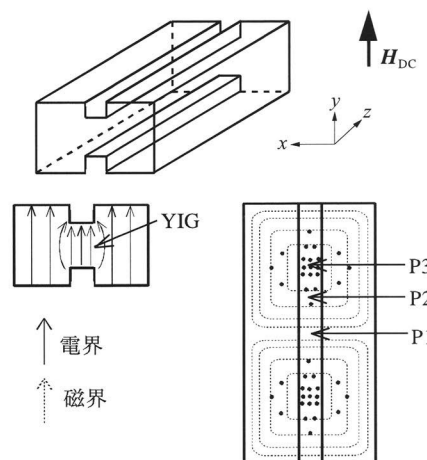


図29 電界・磁界最大点を作る構造 (TE<sub>102</sub>リッジガイド共振器)

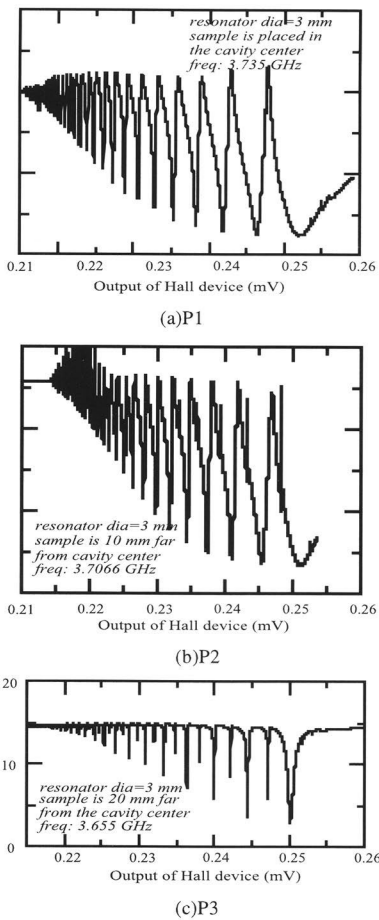


図30 無電極YIGディスク共振器の共振

### 4.3 双異方性媒質

図27の単位粒子を導波管中に多数個並べて実験を行った。今回は非相反性に焦点を当てて図31(a)のような配置を取ってみた。図32(a)が実験結果であるが $|S_{21}|$ に明らかに非相反性が出ている。それに対して図31(b)のように全領域に並べても特に非相反性は増大しない。(図32(b))。非相反性の根源がy方向電界によって生じた金属電極回りの磁界と導波管中のx方向磁界の重畳に基づく事を考えれば定性的な説明

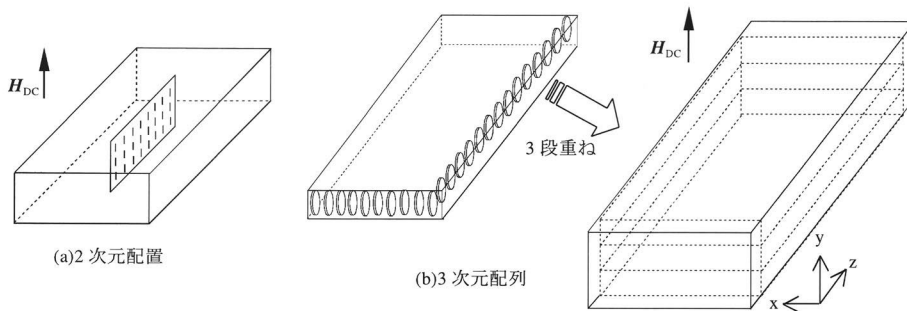


図31 非相反性を得るための単位素子の配置

は可能である。現在摂動法による理論を作っているが無摂動状態としてフェライト粒子の配置を仮定し、摂動状態としてそれに金属電極を取り付けた状態を考えると前者の解析が必要であり、その方法について検討中である。

更に図33のように金属電極の全長を長くしてそれ自身の共振周波数を下げると磁気-電気ダイポールの相互作用が大きくなると予想される。その実験結果は図34のようになり明らかに予想外の共振ピークが出現している。これらは図34に\*印をつけて示されており、直流磁場の変化に対する周波数変化が磁気共振の単調増加とは異なっている。これは恐らく個々の単位粒子の共振ではなく

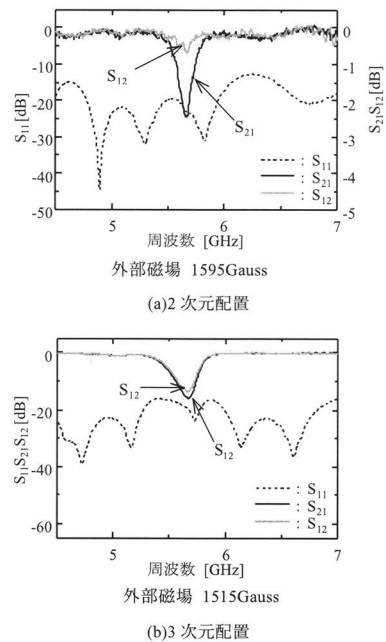


図32 図31の伝送特性

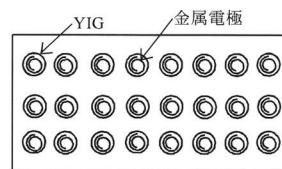


図33 電極を長くした単位粒子

集団としての共振で、まさに我々の目指しているマクロな媒質としての動作であると考えられる。これらの解明を含め、今後の課題についてまとめると次のようになる。

(1) 双異方性媒質を用いて作製した共振器の共振周波数、結合係数、温度特性の測定。これは我々の主張する双異方性媒質がいわゆる媒質として成立しているかどうかを確認する重要な試金石である。更にこの媒質をフィルターとへ応用していくための第1歩である。

(2) 双異方性媒質の構成関係式決定法の開発。この課題は昨年度報告に述べているにもかかわらずまだできていない。上述のように摂動法を用いるのは一つの方向であるが、決して本命ではない。解析的に求める努力を続けるがFDTD法に頼る事も可能である。

## 産業技術への貢献

1. コプレーナ型集中定数帯域通過フィルターとストリップライン形コムライン帯域除去フィルターの新しい

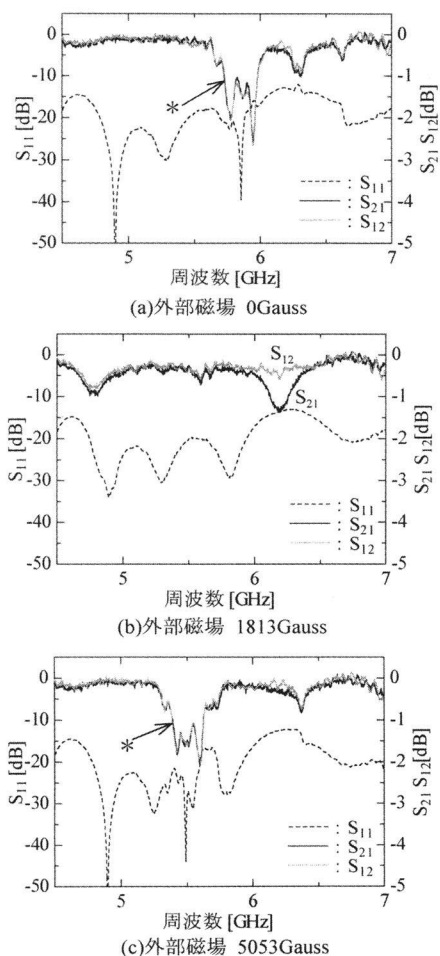


図34 図33の単位素子を2次元配置した場合の伝送特性

形式を提案し、両者とも特許化の作業を進めている。  
2. マイクロ波帯で使用可能な人工媒質を開発するために磁化されたフェライト共振器を単位素子として選び、主として実験的研究を進めた。その結果人工媒質と思われる特性が得られたので、今後更にその特性を詳しく調べ、改善し、かつ制御性を高める必要がある。

## 研究発表

- 1) H.Miyake, S.Kitazawa, T.Ishizaki, M.Tsuchiyama, K.Ogawa and I.Awai: A New Circuit Configuration to Obtain Large Attenuation with a Coupled-Resonator Band Elimination Filter Using Laminated LTCC; IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, TU3C-5, 195-198(2000).
- 2) A.Sanada, A.K.Saha, I.Awai and E.O.Kamenetskii: FDTD Analysis of a Rectangular Ferrite Resonator with a Filamental Surface Metallization; Digest of the 8th International Conference on Ferrites, 135(2000).
- 3) A.K.Saha, E.O.Kamenetskii, and I.Awai: Quasistatic Magnetoelectric Particles - Experimental Investigation at Microwave Frequencies - ; Bianisotropics 2000 Proceedings, 67-70 (2000).
- 4) A.Sanada, A.K.Saha, W.Koga, I.Awai and E.O.Kamenetskii: Electrical Excitation of Ferrite Resonator - Realization of a Bianisotropic Particle - ; Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, 341-344 (2000).
- 5) I.Awai: Recent Advance in Microwave Filter Circuit Design Techniques - Control of Attenuation Poles in Two-Stage Combine BPF - ; Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, 485-491 (2000)
- 6) I.Awai, H.Yamaguchi, M.Tsuchiyama, H.Miyake, S.Kitazawa and T.Ishizaki: Miniaturization of Combine Band Elimination Filter in a Microstrip Configuration; Progress in Electromagnetics Research Symposium (Jul.2001, invited)
- 7) 粟井郁雄, 石崎俊雄, 三宅秀行; 特願 2000-348043
- 8) 粟井郁雄, 石崎俊雄, 三宅秀行; 特願 2000-384834
- 9) 真田篤志, 豊村純次; 山口TLOを通じて特許申請中

## グループメンバー

氏名	所属	職 (学年)
粟井 郁雄	工・電気電子	教授
真田 篤志	工・電気電子	助手
アルクマルシヤハ	理工・システム工学	D2
豊村 純次	理工・電気電子工学	M2
竹原 寛之	理工・電気電子工学	M1
古賀 亘	理工・電気電子工学	M1
アクマドムニール	理工・電気電子工学	M1
E.O.カメネツキー	イスラエル・ベングリオン大学	上級研究員

## 連絡先

電話 0836-85-9455 (ダイヤルイン)

FAX 上に同じ

E-mail : awai@po.cc.yamaguchi-u.ac.jp