

## 76GHz 帯で吸収特性を有するフェライト系電波吸収体の開発

倉橋真司 加藤秀教 堀内健太郎\* 西内正樹\* 末永慎一\*\* 窪田 賢\*\*

The development research of the ferrite type radio absorptive material  
which has an absorption characteristic at the 76 GHz bandKURAHASHI Shinji, KATOH Hidenori, HORIUCHI Kentarou, NISHIUCHI Masaki, SUENAGA Shinichi  
and KUBOTA Ken

近年様々な分野での電波利用が進み、より高い周波数領域であるミリ波帯域での電波利用にも注目が集まっている。特に、衝突防止用レーダ(76.5GHz)や高速無線 LAN(65GHz)などミリ波帯における電波を利用した新しいシステムが導入され始め、これらの周波数帯域に対応した電波吸収機能材の開発が望まれている。そこで、ミリ波帯域で吸収特性が期待できる六方晶フェライトを対象に、組成調整や結晶制御と磁気損失特性との関連をフリースペース法により評価を行った。また、六方晶フェライトをゴム材料に混合したサンプルを試作し、混合比率と複素比透磁率の関連性を評価するとともに、ミリ波帯域に吸収特性を有する吸収体を設計した。

キーワード：ミリ波、六方晶フェライト、電波吸収体、フリースペース法

## はじめに

電磁波吸収体には、導電損失、誘電損失、磁性損失を示す材料が用いられるが、磁性損失材料としては、スピネル型フェライト<sup>1)</sup>などの焼結体や樹脂複合体が従来用いられ、複素比透磁率の周波数分散特性を利用した VHF 及び UHF 周波数帯域のテレビゴースト対策用吸収体が広く利用されている。また、マイクロ波帯域においても、ETC (5.8GHz) やレーダ偽像防止用などにおいても利用されてきているが、近年様々な分野での電波利用が進み、より高い周波数領域であるミリ波帯域での電波利用にも注目が集まっている。特に、衝突防止用レーダ(76.5GHz)や高速無線 LAN(65GHz)などミリ波帯における電波を利用した新しいシステムが導入され始め、これらの周波数帯域に対応した電波吸収機能を有した材料の開発が望まれている。

従来のスピネル型フェライトでは、スネーク限界により、ミリ波帯など高周波帯域で吸収特性を得ることが困難であるため、ミリ波帯域で吸収特性が期待できる六方晶フェライトを対象として、組成調整や結晶制御を行ったフェライト粉末を試作した。また、吸収に起因する複素比透磁率を測定評価するため、誘電体レンズによるビーム収束型フリースペース法<sup>2)</sup>により、フェライト組成と磁気損失特性との関連性を評価した。また、六方晶フェライトをゴム材料に混合したサンプルを試作し、混合比率と複素比透磁率の関連性を評価するとともに、理論計算による吸収体の設計技術について検討した。

その結果、ミリ波帯域において吸収特性を有する六方晶フェライトを得ることができた。さらに、フェラ

イトの組成や結晶制御により、磁気損失ピークを制御可能であることもわかった。また、六方晶フェライトゴムの吸収特性について理論計算と実測値を比較検討し、六方晶フェライトゴムのミリ波帯用電磁波吸収体評価を行ったので報告する。

## 実験方法

## 1. 測定系

吸収に起因する材料定数(複素比誘電率、複素比透磁率)の測定法としては、図1に示すように導波管法や同軸管法などが一般的であるが、ミリ波帯域では波長が短くなるために、測定用試料が微小である。また、導波管毎に試料加工が必要であることなどから、ミリ波帯域での測定は現実的ではない。そこで、板状試料で材料定数値の周波数特性を測定可能な誘電体レンズを用いたフリースペース法で測定した。本測定法は、基本的には導波管法などと同様に、伝送・反射(Sパラメータ)法の原理に基づいた測定法である。

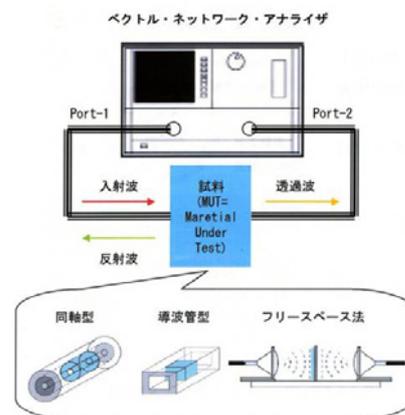


図1 Sパラメータ法による材料定数測定

\*株式会社タケチ \*\*日本弁柄工業株式会社

この研究は、工業技術センター、(株)タケチ、日本弁柄工業(株)の共同研究で実施した。

ネットワークアナライザ(VNA)から発信した電波を誘電体レンズアンテナから測定試料に送信し、試料からの反射波及び、透過波をレンズアンテナで受信した後、反射波、透過波の振幅及び位相量を測定し、その値から複素比誘電率、複素比透磁率を求めた。

測定系の周波数範囲は18-110GHzであるが、測定周波数に対応した導波管に変更して測定する。今回は対象としているミリ波帯域であるV-Band帯(50-75GHz)を中心とした測定を行った。なお、試料サイズは65×65mm、開口部50×50mmのサンプルホルダーを用いて測定した。

2. 六方晶フェライト粉末の作製

ミリ波帯域で吸収特性を有するフェライト系粉末を作製するため、以下に示す基本組成を元に組成調整や結晶構造を変化させた粉末を作製した。

基本組成 [一般式]  $MO \cdot Fe_{(12-x-y)} A_x B_y O_{18}$   
 作製したフェライト系粉末一覧を図2に示す。基本組成の一部を変更することによりM型及び、Z型構造のフェライトやFeの一部を置換した粉末を作製した。

3. 粉末の材料定数測定

作製した粉末の材料定数をフリースペース法で測定するために、ゴムベースに粉末を一定濃度(55Vol%)で混合圧延し測定用板状サンプルを試作した。

フリースペース法では、送受信アンテナ間に測定サンプルをアンテナに対して垂直に設置し、測定サンプル面からの反射波及び、伝送波の振幅位相データであるSパ

ラメータ値から、Nicolson-Ross 演算モデルを用いて複素比誘電率と複素比透磁率を求めた。Nicolson-Rossモデルでは、媒質内波長 $\lambda_g/2$ の整数倍の周波数において発散が発生するため、安定した測定を行うためにはサンプル厚みを $\lambda_g/4$ 程度にする必要がある。そこで、今回の測定周波数帯域と測定サンプル媒質内波長を考慮して測定用サンプルの厚みを0.5mm以下とした。次に、フリースペース法で材料定数測定の特徴を活かした粉末の材料定数測定法として、図3に示す発泡スチロールセルによる新しい測定法を検討した。セル内部を空気のみ状態で測定系を校正した後、セル内部に測定用粉末を充填し、上記のゴムに混合したサンプルと同様に Nicolson-Ross 演算モデルを用いて複素比誘電率と複素比透磁率を求めた。

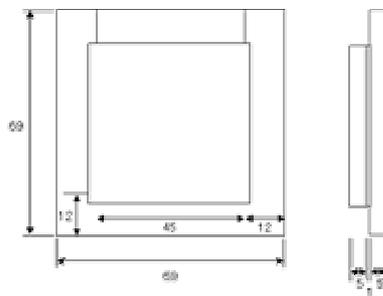


図3 粉末測定用発泡セル

組成(配合)

一般式  $MO \cdot Fe_{(12-x-y)} A_x B_y O_{18}$

M : C or D
A : E <sup>3+</sup>
B : F <sup>3+</sup>

添加物:G

NT001	EWA-3E		
NT002	組成B ①		
NT003			
NT004	組成B ②		
NT005			
NT006	組成B ③		
NT007			
NT008	粒子サイズ* サイズ ↓	形状	
NT009			
NT010	粒子サイズ* サイズ ↓ ↓	形状	
NT011			
NT012	組成B ④		24GHz帯域用
NT013			
NT014			
NT015	組成B ⑤		
NT016			
NT017	EWA-3E	NT024 サイズ ↓	
NT018	組成A ①		
NT019	組成M ①		
NT020			
NT021	組成M ②		
NT022			
NT023	添加物 ①	NT025 サイズ ↓	

NT026	原料系		
NT027			NT032 サイズ ↑
NT028	フェライトタイプ①	組成A ②	
NT029			
NT030	フェライトタイプ②	組成A ③	
NT031			
NT033			
NT034	組成A ④		NT036 サイズ ↓
NT037			NT035 コンセント ↑
NT038		組成B ⑥	
NT039			
NT040	組成M ③	添加物 ②	
NT041			
NT042			
NT043	組成M ④		
NT044		添加物 ③	
NT045			
NT046			
NT047	製法		
NT048			
NT049			
NT050	組成 調整		
NT051			
NT052	NT050	80%	
NT054	コンテンツ ↑ ↓	85%	
NT041		90%	

図2 作製したフェライト系粉末一覧

4. 吸収特性の理論計算と実測

単層型電波吸収材の基本構造を図4に示す。

図に示すように、電波が電波吸収材表面に対して垂直に入射し、その入射方向に反射する場合には、吸収材の複素比誘電率と複素比透磁率が  $\epsilon_r$  と  $\mu_r$  であれば、吸収体表面の特性インピーダンス  $Z_{in}$  は、電磁波吸収理論<sup>4)</sup>により、以下の式により表すことができる。

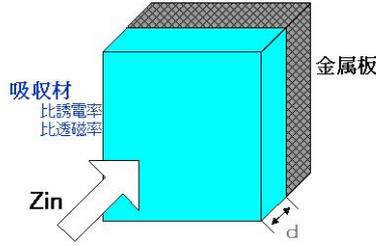


図4 電波吸収体の基本構造

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \left( \tanh j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \right)$$

ここで、 $d$  は吸収体の厚み、 $\lambda$  は波長  
電磁波吸収体の吸収特性を表す反射係数  $S$  は、

$$S = \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1}$$

により求めることができる。したがって、試作したゴムベースにフェライト系粉末を混合したサンプルの複素比誘電率、複素比透磁率の周波数に対する値がわかれば、厚みを変数として、吸収特性を理論的に求めることが可能となる。

材料定数測定値から吸収体の可能性のある材料の選定を行うとともに、厚みを変数として吸収特性の理論計算を行うとともに、計算値から求めた厚みで実際にサンプルを試作し、吸収特性の実測値との比較検討を行った。

結果と考察

1. フェライト系粉末混合ゴムの複素比透磁率測定

基本組成を元に組成調整や結晶構造を変化させた粉末の磁気特性を評価するために、ゴムベースに作製したフェライト系粉末を一定比率(55Vol%)で混合したサンプルのうち NT033 の測定結果を図5(a)(b)に示す。サンプル厚みによる演算モデルの発散を確認するために、0.4mmと1.11mm厚みで測定した。

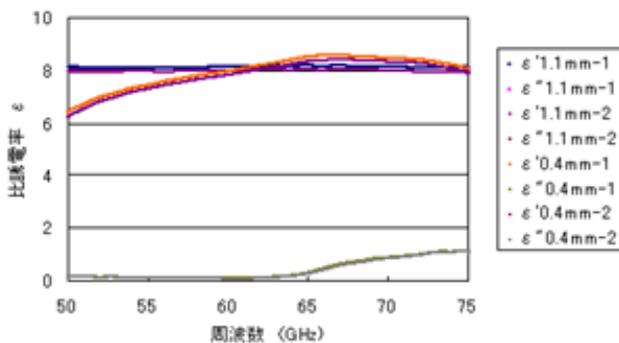


図5(a) NT033の比透磁率値

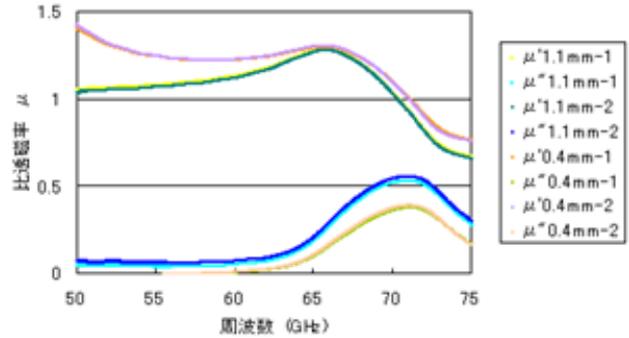


図5(b) NT033の比透磁率値

サンプル厚みが1.1mmのサンプルでは、50GHz以下の周波数で発散が発生していることが、図から確認でき、測定サンプルの厚みについては媒質内波長の1/4以下の厚みのサンプルでの測定が必要であることがわかる。また、図中の-1は、サンプル設置方向が水平、-2は垂直方向での測定結果を示しているが、サンプル設置方向により測定値に変化がないことから、配向性がないことが確認できた。磁性損失については、約70GHz付近に比透磁率のピークがあることが確認でき、吸収材料として可能性がある材料であることがわかる。この結果から、自由空間法による材料定数測定がフェライト系材料の評価に有効であることがわかった。

次に、フェライト系粉末種類と比透磁率虚数部との関連を図6、図7に示す。

図6には、V-Band帯を対象とした[NT020-038]、図7にはK-Band帯を対象とした[NT011-016]粉末の測定結果を示す。

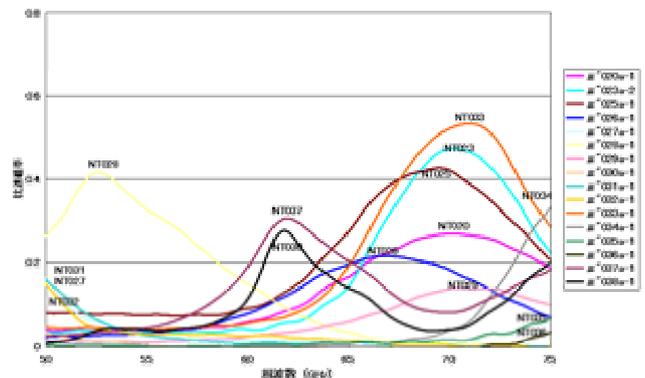


図6 V-Band帯粉末の比透磁率虚数部

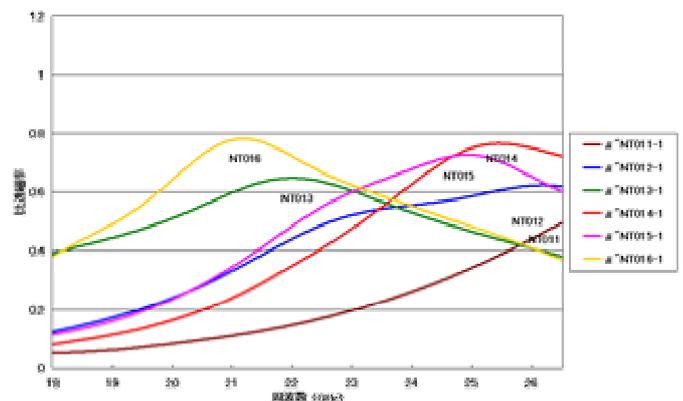


図7 K-Band帯粉末の比透磁率虚数部

図から、粉末の組成調整により吸収に起因する複素比透磁率虚数部  $\mu''$  のピーク値及び、周波数が変化していることがわかる。

$\mu''$  ピーク変化と組成調整との関連性について詳細に検討を行った。NT027、NT028、NT029 粉末は、同一の Z 型フェライトが基本構造であり、Fe の一部を置換することで組成調整を行った粉末の測定結果を図 8 に示す。置換量を NT027<028<029 の順で増加した粉末である。

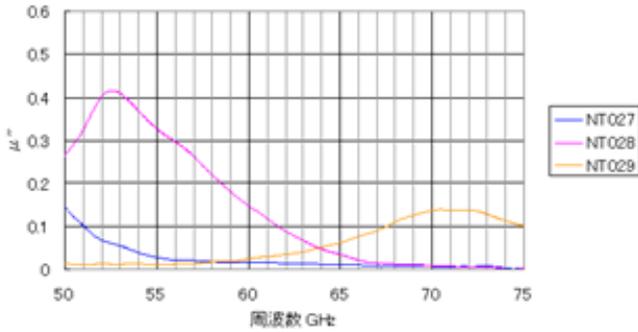


図 8 置換量と比透磁率虚数部変化

$\mu''$  のピーク周波数が、置換量を増加させるとともに、高周波側に移行していることが確認できる。また、ピーク値については高周波に移行するとともに減少傾向となった。

図 9 には、基本構造が M 型フェライトを対象として Fe の一部を置換した NT033、034 粉末の  $\mu''$  を示す。置換量については、NT033<034 である。置換量が増加すると  $\mu''$  ピークの周波数が高周波側に移行した結果となり、Z 型フェライトと同じ傾向となった。

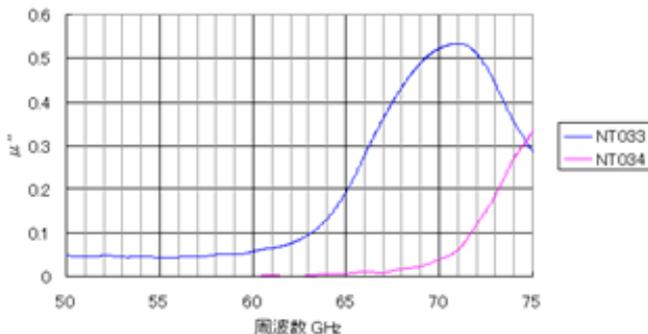


図 9 置換量と比透磁率虚数部変化

今回の測定は、ゴムに測定対象の粉末を混合したフェライトゴムをサンプルとして測定した。ゴム材は誘電材料であり、磁性損失は存在しない。そこでベース材ゴムの材料定数を測定し、複素比透磁率値が  $1 - j 0$  であることを確認した。これらの測定結果から、六方晶フェライト粉末は、ミリ波帯域において  $\mu''$  ピークを有した磁性材料であり、磁気損失による吸収体粉末の可能性が確認できた。また、六方晶フェライトの組成調整や置換による手法により、 $\mu''$  ピーク周波数帯やピークの大きさを自在に操作可能であることもわかった。

2. 発泡セルによる粉末の複素比透磁率測定

通常の方法測定では、粉末をそのまま測定することは不可能であり、粉末を樹脂材料などに混合成形した複合材料を作製した後に、測定法にあわせてサンプルを加工して初めて測定できるのが現状である。そこで、粉末自身の材料定数を測定する新しい測定法として、発泡セルを用いた粉末材料定数測定法を検討するとともに可能性を評価した。本測定法は、フリースペース法での伝送線路である空気と電磁気的にほぼ同等である発泡スチロールでセルを構成し、セル間に充填した粉末をサンプルとして、材料定数を測定する手法である。測定粉末として [EWA-3E][NT033][NT042] を対象に測定した結果を図 10 に示す。ここで、セル隙間は 0.5mm で体積から求めた充填率は 44wt% である。

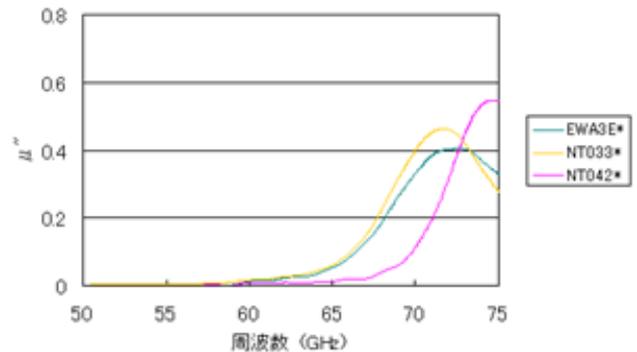


図 10 発泡セルによる粉末測定

粉末毎に  $\mu''$  のピーク周波数及び、値が異なった結果となり、発泡セルによる粉末測定法で粉末の磁性損失特性が評価可能であることが確認できる。発泡セルでの粉末測定値とゴムに粉末を混合したサンプルでの測定値の比較検討を行った結果を図 11 に示す。

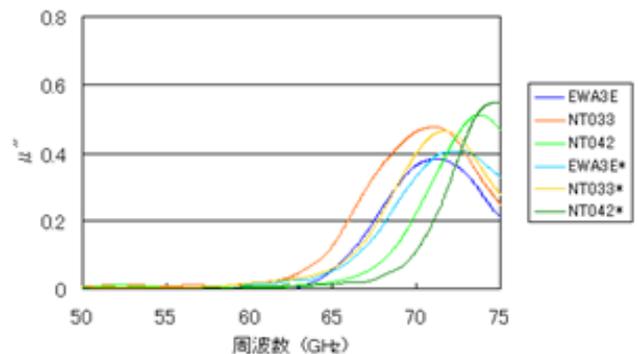


図 11 測定法比較 (\*発泡セル)

測定した粉末すべてにおいて、 $\mu''$  のピーク周波数及び、値が若干異なった結果となった。値については充填率が異なっているために問題ではないが、ピークの周波数については同じ粉末ならば一致するはずである。しかし、発泡セルでの粉末測定値は、ゴムに混合したサンプルと比較して、いずれの粉末も  $\mu''$  のピーク周波数が高周波側に数 GHz 高めに移動した。この原因としては、ゴムに混合した場合には、フェライト粉末の周囲を誘電体に囲まれた状態となり磁気特性に影響を与えていること。また、粒子間距離や粒子配列などが影響し相互磁気モーメントなどが異なっていることなど

が考えられる。これらについては、より詳細な検討が必要ではあるが、発泡セルでの粉末の材料定数測定は、評価可能であることがわかった。

### 3. 粉末混合比率と複素比透磁率の関連

複素比透磁率測定結果から、ミリ波帯域での吸収特性が期待できる粉末 [ NT033 ] を選定し、混合比率と複素比透磁率の関連を評価した。

[ NT033 ] 粉末を、80wt%、85wt%、90wt% 混合したゴムサンプルを作製して測定した結果を図 12 に示す

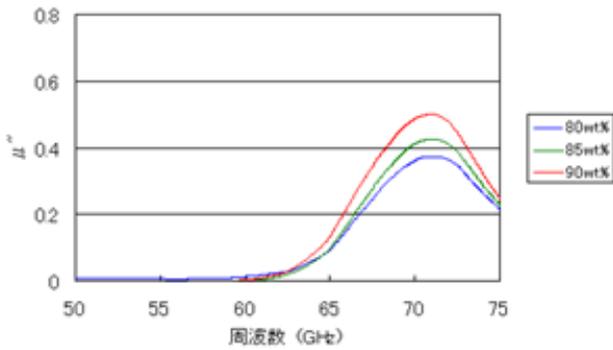


図 12 混合比率と比透磁率虚数部

混合比率が増すごとに、 $\mu''$  の値が増加した、ピーク周波数については、混合比率に関係なく約 71GHz 付近となった。他の粉末でも、混合比率と  $\mu''$  については、同様な結果となった。このことから、 $\mu''$  のピーク周波数については、粉末の組成調整や結晶構造などで制御することが可能であり、 $\mu''$  ピークの大きさについては、混合比率で制御することが可能であることがわかった。

### 4. 電波吸収材の設計

電波吸収材を設計するために、[ NT033 ] 粉末を EVA ゴムに 60Vol% 混合したサンプルを試作し、材料定数を測定した。これまでの測定用サンプルについては、混練性に優れている NBR ゴムを用いていたが、製品化を考慮して耐候性と加工精度に優れており、他の周波数帯での吸収材として製品化実績のある EVA を用いた。図 13(a) は複素比誘電率、また、(b) には複素比透磁率の測定結果を示す。

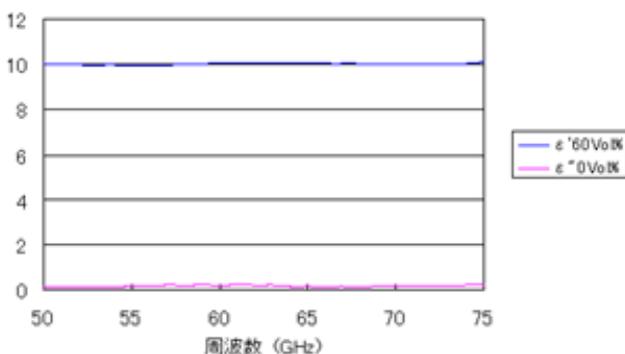


図 13(a) NT033(60Vol%)比誘電率

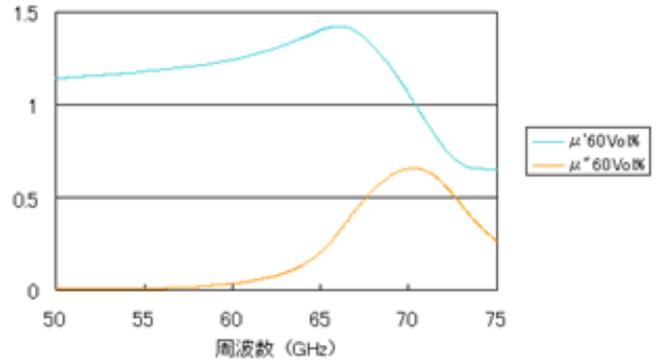


図 13(b) NT033(60Vol%)比透磁率

ベースゴムが異なっても  $\mu''$  のピーク周波数がほぼ一定であることが確認できる。この測定した材料定数値を元にして厚みを変数(01mmStep)として理論計算により吸収特性を得る最適厚みを求めた。その結果、厚み 0.29mm で約 68.8GHz、また、厚み 0.91mm で約 64.6GHz に吸収のピークを得ることができると計算結果を得た。

設計厚みを 0.29mm と 0.91mm として、サンプル作製を行い、理論計算と実測値の比較検討を行った。

作製したサンプル厚みについて、マイクロメータでサンプル上の任意の点測定し平均値を求めた。

[ 0.29mm ] [ 0.2826mm ] [ 0.91mm ] [ 0.9028mm ] 測定点による厚みのバラツキが確認でき、最大で 0.01mm の厚み誤差があることがわかった。

理論計算値と実測値比較を図 14 に示す。

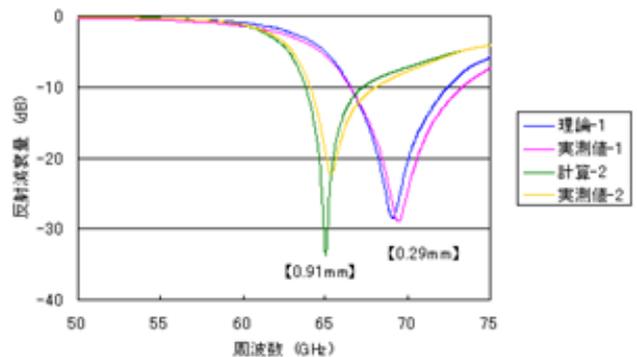


図 14 理論計算値との比較

[ 0.29mm ] [ 0.91mm ] とともに、理論計算値と実測値がほぼ一致した。理論計算と若干ずれる原因としては、吸収材料の厚み誤差や実測時の金属板との隙間などが考えられるが、基本的な吸収特性の把握には問題ない程度である。

理論計算により、材料定数値から吸収材料の設計ができるとともに、吸収特性についても吸収周波数や反射減衰量の大きさなどを把握することが可能であり、ミリ波帯域の電波吸収材設計に十分利用できることがわかった。

## ま と め

ミリ波帯域で吸収特性が期待できる六方晶フェライトを対象として、組成調整や結晶制御と磁気損失特性

との関連をフリースペース法により評価した。また、六方晶フェライトをゴム材料に混合したサンプルを試作し、混合比率と複素比透磁率の関連性を評価するとともに、理論計算による吸収体の設計技術について検討を行い以下の成果を得た。

- (1) 吸収に起因する材料定数値を評価するために誘電体レンズによるフリースペース法での伝送反射波 S パラメータ値から演算により求めた。サンプル厚みを媒質内波長の 1/4 以下(約 0.5mm)とすることで、精度良く測定することができた。
- (2) 作製した六方晶フェライト系粉末は、ミリ波帯域において、吸収に起因する複素比透磁率虚数部  $\mu''$  のピークを有した粉末材料であることが確認できた。また、六方晶フェライト粉末組成の Fe を置換することで、 $\mu''$  ピーク周波数が高周波域に移行し、置換量と周波数移動量には相関があることがわかった。組成調整や結晶構造により、 $\mu''$  ピーク周波数などを制御することがわかった。
- (3) 粉末の複素比透磁率を測定する方法として、従来にはない発泡スチロールセルによる粉末測定法を検討した。従来の測定法では、測定用粉末を樹脂などに混合成形し複合材料として評価していたが、本測定では混合成形が必要なく粉末のまま簡単に測定できるメリットがある。測定値の比較の結果、ピーク周波数に若干のずれがあるが、粉末の  $\mu''$  ピーク傾向を把握できることがわかった。
- (4) ミリ波帯域において吸収特性を得ることが可能な粉末を選定し、粉末混合比率と  $\mu''$  の関連性を評価した結果、混合比が増すごとに  $\mu''$  ピークが増加することがわかった。 $\mu''$  ピーク周波数は、粉末の組成調整により制御可能であり、混合比率とあわせることで、吸収材設計の自由度が向上することが期待できる。
- (5) 材料定数値を元にして、最も効果的な吸収特性が得られる厚みを理論計算により求めた。求めた厚みで吸収材を試作し、吸収特性を測定したところ、測定値が理論計算値と一致した。理論計算により、吸収周波数や反射減衰量などの吸収特性を把握することが可能で、吸収材の設計に十分利用できることがわかった。

## 文 献

- 1) 清水康敬, 杉浦行, 石野健: 最新電磁波の吸収と遮蔽, 第 2 版, (日経技術図書), 518-531(1999).
- 2) 戸高嘉彦, 東田豊, 西方敦博, 高橋孝, 橋本修: ミリ帯における電波吸収体の測定法に関する一検討, 信学技法, EMC-J2004-33(2004).