

シラスバルーンを用いた複合フェライト電波吸収体の開発

電子部 上 藺 剛, 尾前 宏, 永吉弘己, 袖山研一*, 濱石和人*

Development of a Compound Ferrite Electric Wave Absorption Body Using Sirasu-balloons

Tsuyoshi UEZONO, Hiroshi ONOMAE, Hiromi NAGAYOSHI, Ken-ichi SODEYAMA and Kazuhito HAMAISHI

マイクロ波帯域で良好な電波吸収特性を有する電波吸収体に、鹿児島県で豊富に生産されるシラスバルーンが利用できないか検討した。開発目標を高速道路のETCシステム等で用いられる5.8GHz帯に対応する平板型電波吸収体とした。研究は、材料の選択、小型のサンプルの試作、素材としての電気特性を同軸管法で評価、シミュレーションによる設計、電波吸収体の試作、そしてアーク法で電波吸収特性を評価するという手順で行った。検討の結果、ETC用平板電波吸収体では目標とする5.8GHzを中心に広い範囲で20dB以上の吸収特性を有するものを開発できた。

Keyword : シラスバルーン, フェライト, 電波吸収体, ETC

1. 緒 言

現代社会では、電子機器の高速化、無線LANや携帯電話などの普及に伴い、電子機器の電磁波による相互干渉が社会問題化している。このため、マイクロ波帯域における電磁波対策が必要となり、その対策方法としてマイクロ波帯の電磁波を吸収する電波吸収体が注目されている。

一般に電波吸収体は、電波を吸収（減衰）させるために損失材料を含有しており、これを大きく分類すると抵抗体、誘電体、磁性体に分類される。電波は磁界成分と電界成分を持っているので、磁性体中の磁気分極や誘電体内の誘電分極の相互作用でエネルギーを消費され減衰していく。

損失材料のエネルギー損失は電波の周波数によって変化し、磁性体では透磁率、誘電体あるいは導電体では誘電率がそれを表す主なパラメータとなる。損失材料の透磁率、誘電率は一般に複素数の形で表され、虚部が損失を表す。

現在誘電体を用いた電波吸収体の理論は既に完成されており^{1), 2)}、理論に基づいた各周波数帯での薄層電波吸収体が報告されている。しかしながらいずれも磁性体電波吸収体³⁾と比較すると優れたものが得られていない。また、フェライト粉末を非磁性体材と混合させたフェライト複合材料を用いることで、マイクロ波帯で利用可能な電波吸収体が製造可能であることが知られている^{4), 5)}。そこで、磁性材料であるフェライトと鹿児島県内で生産され、軽量で耐熱性に優れているシラスバルーンを用いて複合フェライト電波吸収体の開発を行った。

今回、複合化に用いたシラスバルーンは、火山噴出物のシラスを流動床炉で約900℃以上に急速加熱し、シラスに含まれる水分のガス化で発泡した多孔質構造の火山ガラス

質粉粒体である。空隙が多いため誘電率が低く、比重も約0.2と軽量である。フェライトを空間内に離散的に分散させるためにも、また、電波吸収体の比重を小さくするためにも、さらに不燃材であることから有効な素材である。

電波吸収体は、空間を伝搬してくる電波を効率よく電波吸収体内部に取り込ませるため、表層部は空気の状態に近く、深層部になるに従って電波吸収材の濃度が濃くなる構造が望ましいとされている。これを実現する方法として、濃度が均一な電波吸収体材料をピラミッド状に成型し、見かけ上のフェライト濃度を連続的に増やす方法と、フェライトの混合割合の異なるものや、特性の異なるフェライトを多層構造にする方法、濃度を変えて多層構造にする方法などが提案されている^{4), 5)}。今回の開発では、現在整備されつつある高速道路の自動料金収受システム（ETC：Electronic Toll Collection System）に使用される狭帯域タイプの平板型電波吸収体（5.8GHz対応）を目標とした。

ETCは料金所と車の間で5.8GHzの周波数を利用して通信を行い、高速道路料金を精算するものである。しかし、料金所から出る電波は、料金所建物等で乱反射し通信対象とする車以外の車（後続車など）と誤通信を行い、料金が加算されなかったり、誤ってゲートが閉じて事故を起こしたりという不具合が発生している。このため乱反射を抑えるための電波吸収体を料金所建物に貼り付けて対策している。現在施工されているものは、樹脂に吸収素材を含有させたものが主であるが、これらは火災の際、有毒ガスを発生するため不燃性の電波吸収体が望まれている。本研究の電波吸収体は、不燃材料のみの構成であり本用途に適している。

*素材開発部

2. 実験手順

電波吸収体の開発は、まず高周波特性に優れたフェライト材料を選択し、シラスバルーンとフェライトを様々な組合せで混練した小型のテストピースを試作して、素材としての電気特性(複素比誘電率(以下誘電率)、複素比透磁率(以下透磁率))を同軸管法で評価した。次に、得られた電気特性のデータと、吸収させたい周波数帯域や吸収レベル及び電磁波の入射角度条件をもとに、電波吸収体の形状や厚み等をシミュレーションで検討し、使用する素材を選び、実際の形状の電波吸収体を試作した。そして、試作した電波吸収体をアーチ法で評価するという手順で行った。

表1 用いたシラスバルーン

本報告での記号	S S	F T B
外観	淡黄白色	淡黄白色
かさ比重	0.25~0.30	0.25~0.30
平均粒径(μm)	95	13

3. 構成材料

3.1 シラスバルーン

今回使用したシラスバルーンは表1に示す平均粒径が95μmと13μmのものを用いた。

3.2 バインダ

材料を固めるバインダは表2に示す水ガラス(JIS K1408, 1号相当品)とセメント(JIS R5210相当品)を用いた。

3.3 フェライト

電磁波を吸収するためのフェライト材は、表3に示す置換M型六方晶系, Mn-Zn系, Ni-Zn-Cu系, 超微粒子Ni-Zn系, Mg-Zn-Cu系のものを使用した。

表2 用いたバインダ

	水ガラス	セメント
J I S	K1408	R5210
型式	1号珪酸ソーダ	普通ポルトランドセメント
容量	30kg	25kg

表3 用いたフェライト

	フェライト1	フェライト3	フェライト4	フェライト5	フェライト6
組成	置換M型六方晶	Mn-Zn	Ni-Zn-Cu	超微粒子Ni-Zn	Mg-Zn-Cu
粉体圧縮密度(g/cm ³)	2.86	3.26	3.63	1.38	3.2
平均粒径(μm)	1.36	3.20	5.58	0.015	5.1

4. 材料定数測定

4.1 材料定数測定用サンプルの作製

4.1.1 サンプルの形状及び種類

材料の電気的定数を求める方法として同軸管法を用いた。測定の手法については後述するが、この場合測定器に接続されたサンプルホルダーにサンプルを挿入し測定を行う。今回は、主として1GHz以上を対象としているため、高周波数用のサンプルホルダーを用いた。高周波数用のものは、500MHz~18GHzに対応しており、これに挿入されるサンプルの形状はドーナツ型で、そのサイズは内径が3.1mm, 外径が6.9mmである。そのサイズから一般に7Dサンプルホルダーと呼ばれる。サンプルの形状を図1に示す。このサンプルホルダーは、挿入するサンプルの長さに合わせて5mm, 10mm, 15mm, 20mmの4種類が用意されている。

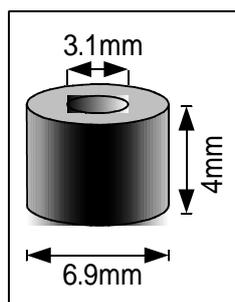


図1 サンプル形状

サンプルはシラスバルーン2種類、フェライト5種類、バインダ2種類のそれぞれの組み合わせで作製し、さらにフェライトは濃度を5段階で作製した。製造したサンプルは以下管理コードを用いて管理する。管理コードを表4に示す。

ここで水ガラス硬化法においては、フェライトの含有量を体積比で、セメント硬化法においては、フェライトの含有量を重量比で記述している。混合比はサンプル製造後の割合である。水ガラス硬化法では炭酸ガスにより若干の重量増となるが、およそ1%以下であるため無視している。また、セメント硬化法では水を加えるが、乾燥後はほぼすべてが蒸発するので無視できる。

また、作製するサンプルによる影響を調べるために、サンプルの長さによる違い、サンプルホルダの長さによる違い、バインダの量による違い及び密度による違いを確認するためのサンプルも作製した。

4.1.2 水ガラス硬化法

バインダとして水ガラスを用いた。指定量のシラスバルーンとフェライトを混合した。これに水ガラスを加えてさらに攪拌し、型にはめ込み5MPaの圧力を加え、型から外した。これを密封容器に入れ、真空引きした後、炭酸ガス雰囲気中に置換することで硬化させた。製造イメージを図2に示す。

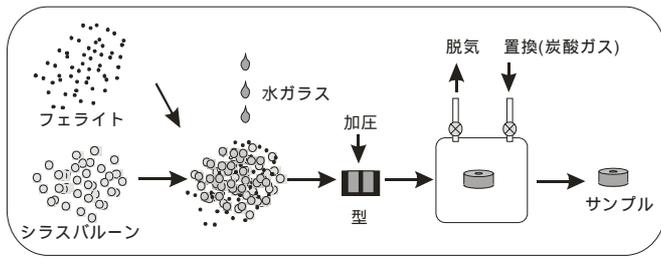


図2 水ガラス硬化法の製造イメージ

表4 管理コード

フェライト種類	セメント硬化法			水ガラス硬化法		
	濃度	FTB	SS	濃度	FTB	SS
-	0%	F00	S00	0%	WF00	WS00
置換M型六角晶 フェライト	10%	F11	S11	10%	WF11	WS11
	30%	F13	S13	20%	WF12	WS12
	50%	F15	S15	30%	WF13	WS13
	70%	F17	S17	40%	WF14	WS14
Mn-Znフェライト	90%	F19	S19	50%	WF15	WS15
	10%	F31	S31	10%	WF31	WS31
	30%	F33	S33	20%	WF32	WS32
	50%	F35	S35	30%	WF33	WS33
Ni-Zn-Cuフェライト	70%	F37	S37	40%	WF34	WS34
	90%	F39	S39	50%	WF35	WS35
	10%	F41	S41	10%	WF41	WS41
	30%	F43	S43	20%	WF42	WS42
超微粒子Ni-Zn フェライト	50%	F45	S45	30%	WF43	WS43
	70%	F47	S47	40%	WF44	WS44
	90%	F49	S49	50%	WF45	WS45
	10%	F51	S51	10%	WF51	WS51
Mg-Zn-Cu フェライト	30%	F53	S53	20%	WF52	WS52
	50%	F55	S55	30%	WF53	WS53
	70%	F57	S57	40%	WF54	WS54
	90%	F59	S59	50%	WF55	WS55
	10%	F61	S61	10%	WF61	WS61
-	30%	F63	S63	20%	WF62	WS62
	50%	F65	S65	30%	WF63	WS63
	70%	F67	S67	40%	WF64	WS64
	90%	F69	S69	50%	WF65	WS65

4.1.3 セメント硬化法

バインダとしてセメントを用いた。指定量のシラスパルーン、フェライト及びセメントを混合した。これに水を加えてさらに攪拌し、型にはめ込み5MPaの圧力を加え、型から外した後、1昼夜放置した。製造イメージを図3に示す。

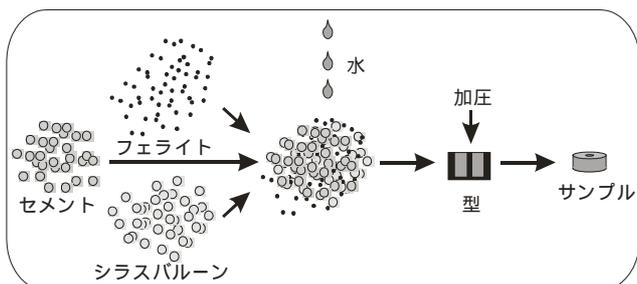


図3 セメント硬化法の製造イメージ

4.2 測定装置及び測定方法

測定にはネットワークアナライザと、サンプルをセットするサンプルホルダーを用い、同軸管法と呼ばれる方法で測定する。ネットワークアナライザとは高周波回路、素子の高周波特性(インピーダンスなど)を測る計測器で、回路や素子に高周波を入力し、回路からの反射、通過に対する回路や素子の高周波特性を測るものである。図4に示すとおり、ネットワークアナライザのPort 1とPort 2にケーブルを接続し、さらにそのケーブル端にサンプルホルダーを装着する。サンプルホルダーには作製したサンプルを挿入する。この装置を用いて、Sパラメータと呼ばれる値(S11, S12, S21, S22: 散乱行列Sの各要素)を測定し、さらにこの値を基に材料定数である誘電率、透磁率を算出する。使用した機器を表5に示す。

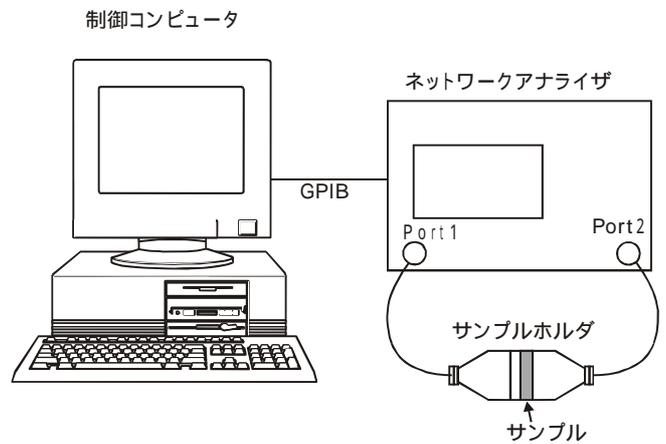


図4 測定イメージ

表5 使用機器

		同軸管法	アーク法
ネットワークアナライザ	HP8722D (500MHz ~ 40GHz)		
ホーンアンテナ	EMC03115 (1GHz ~ 18GHz)	-	
サンプルホルダー	Model CHS2 APC7		-
解析ソフト	HP8507 1 B	-	

ここでSパラメータを2ポート入出力の場合について簡単に説明する。2つのポート(出入り口)を持つブラックボックス(ここではサンプル)に交流信号(電波)という波が入り出す状況を想定したものが図5である。その波の反射や透過の具合でブラックボックスを表したものがSパラメータであり、S11, S12, S21, S22の4つの値からなる。ポート1から入射した波が自身のポートに反射していく度合いがS11, ポート2に透過していく度合いがS21である。反対にポート2から入射した波が自身のポートに反射していく度合いがS22, ポート1に透過していく度合いがS12である。

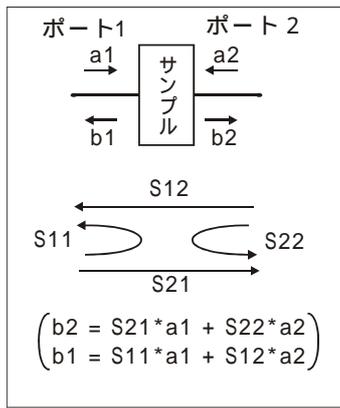


図5 Sパラメータの説明図

次にSパラメータの測定値をもとに、誘電率、透磁率を求める方法を説明する⁶⁾。図6のように同軸エアラインの内部に誘電率 ϵ_r 、透磁率 μ_r のサンプルを充填すると、その部分の特性インピーダンスZおよび伝搬定数が変化する。サンプルを充填する前のそれらの値を Z_0 、 β_0 、充填後の値をそれぞれZおよび β とすると、導波管TEモードにおいては、次の関係がある。

$$K = \frac{\mu_r (1 - \beta_0^2)}{\epsilon_r \mu_r - \beta_0^2} \quad (1)$$

$$\beta = j \frac{2}{g}, \quad \beta_0 = \frac{2}{g} \frac{(\epsilon_r \mu_r - \beta_0^2)}{(1 - \beta_0^2)} \quad (2)$$

ここで

$$g = \frac{\beta_0}{(1 - \beta_0^2)}, \quad \beta_0 = \frac{c}{f} \quad (3)$$

$$= \sqrt{1 - \left(\frac{\beta_0}{g}\right)^2} = \frac{fc}{f} \quad (4)$$

ただし、 g ：管内波長、 β_0 ：自由空間波長、 f ：測定周波数、 fc ：導波管の遮断周波数、 j ：虚数単位、 c ：光速である。同軸TEMモードの場合は遮断特性を持たないので $fc=0$ と考えればよく、(4)式より $\beta = 0$ となる。

(1)、(2)式より

$$\mu_r = \frac{K \cdot \beta_0}{2j}, \quad \epsilon_r = \frac{\mu_r}{K^2} \quad (5)$$

長さdの区間がサンプルで充填されているとき、その両端の面を参照面にして2ポート入出力素子と見なせば、その伝送・反射特性を表すSパラメータは $p = \exp(-\beta d)$ と置いて次式で与えられる。

$$S_{11} = S_{22} = R = \frac{(1 - K^2)(1 - p^2)}{(1 + K)^2 - (1 - K)^2 p^2}$$

$$S_{12} = S_{21} = T = \frac{4 \cdot K \cdot p}{(1 + K)^2 - (1 - K)^2 p^2} \quad (6)$$

(6)式より

$$K = \pm \frac{\sqrt{((1 - R^2 + T^2) - 4T^2)}}{(1 - R)^2 - T^2}$$

$$p = \frac{(1 - R^2 + T^2) - ((1 - R)^2 - T^2)}{2 \cdot T} \quad (7)$$

$$= -\frac{1}{d} (\log p + 2n - j), \quad n: \text{integer}$$

(7)式にネットワークアナライザで測定したSパラメータを代入して(5)式により ϵ_r 、 μ_r を求める。

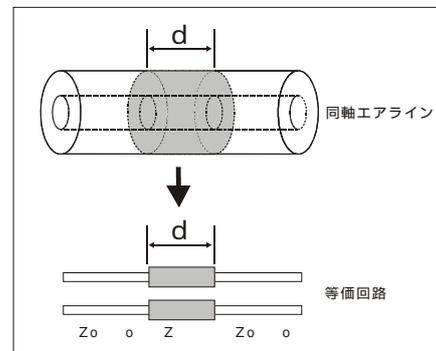


図6 サンプルを充填した同軸管とその等価回路

4.3 サンプルの材料定数予備測定と結果

4.3.1 取得データに及ぼすサンプルの長さの影響

同軸管法ではサンプルの長さに自由度を持たせるために、複数の長さのサンプルホルダーが用意されている。そこでサンプルの長さによる材料定数の違いについて調べた。実験は管理番号F19の素材を用い、同じ配合比のサンプルで、長さの違うものを5種類作製し測定した。比較したデータは得られた透磁率と誘電率から算出される電波の反射係数を用いた。算出方法については5章の”シミュレーション”で詳しく後述する。以後のサンプル測定についても同様の比較を行った。

サンプルの説明を表6に、結果を図7に示す。4mm~20mmのどれでもほぼ同じ結果でありサンプルの長さは測定結果に影響しないと考えられる。

表6 サンプル説明

サンプルの名称	意味
F19_040	長さ 4mm
F19_090	長さ 9mm
F19_100	長さ 10mm
F19_150	長さ 15mm
F19_200	長さ 20mm

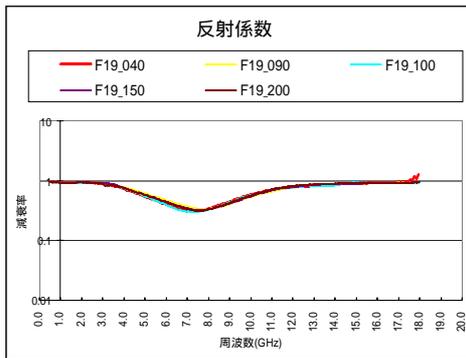


図7 サンプルの長さによる影響

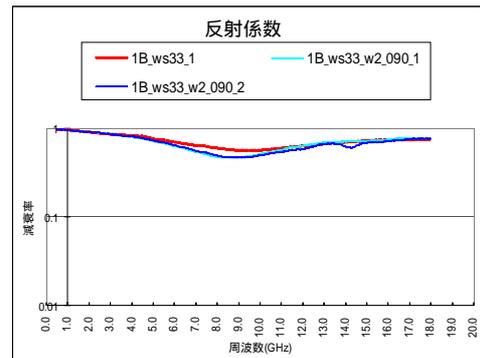


図9 バインダの量による影響

4.3.2 取得データに及ぼすサンプルホルダーの長さの影響

サンプルホルダーは4種類の長さが用意してあることは前述のとおりである。そこで、10mmの長さの同じサンプルを、10mmと20mmのサンプルホルダーで測定した。

サンプルの説明を表7に、結果を図8に示す。10mm、20mmどちらのサンプルホルダーでもほぼ同じ結果が得られたので、サンプルホルダーの長さは測定結果に影響しないと考えられる。

表7 サンプル説明

サンプルの名称	意味
F19_100for100sampholder	10mmサンプルホルダーで測定
F19_100for200sampholder	20mmサンプルホルダーで測定

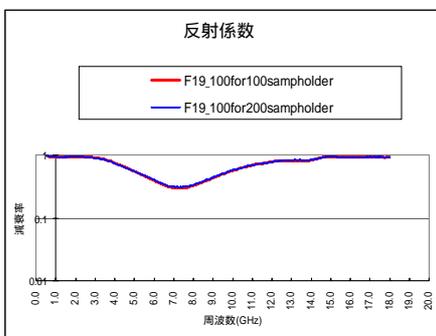


図8 サンプルホルダーの長さによる影響

4.3.3 取得データに及ぼすバインダ量の影響

基準となるサンプルとしてWS33を用意した。これと比較するサンプルとして、基準サンプルの配合比で水ガラスのみを倍にしたものを用意した。

サンプルの説明を表8に、結果を図9に示す。バインダの量が多いほど吸収量が多くなっており、バインダ量による影響は大きいことが解った。

表8 サンプル説明

サンプルの名称	意味
1B_ws33_1	基準サンプル
1B_ws33_w2_090_1	上記の水ガラスを倍にした物のNo.1
1B_ws33_w2_090_2	上記の水ガラスを倍にした物のNo.2

4.3.4 取得データに及ぼすサンプルの密度の影響
基準サンプルとしてWS33を用意した。これと同じ配合比の素材を、重量で100%、125%、150%の分量を、同一体積になるよう加圧成型したものと比較した。

サンプルの説明を表9に、結果を図10に示す。同じ配合比でも密度が高い(単位体積あたりすべての素材が多い)ほど吸収量が多くなっており、密度による影響は大きいことが解った。

表9 サンプル説明

サンプルの名称	意味
1B_ws33_1	基準サンプル
1B_ws33_125_090	上記の125%の分量を同一体積に充填
1B_ws33_150_090	上記の150%の分量を同一体積に充填

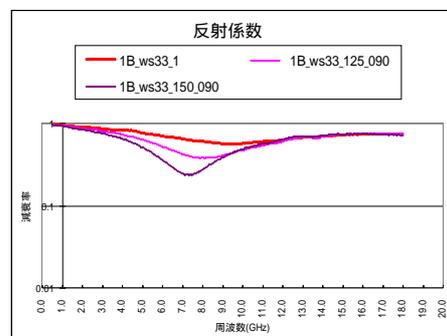


図10 サンプルの密度の影響

4.4 材料定数測定

予備実験をふまえ、サンプルの長さを4mm、サンプルホルダーは5mmを使用し測定を行った。測定に際しては同様のサンプルを3個測定し、その平均を用いた。

4.5 材料定数測定の結果と考察

4.5.1 フェライトの種類による違い

フェライトそれぞれで材料定数が違うことを確認した。しかしながらその違いは画一的なものではなく一定のルールを見つけだすには至らず、フェライトそれぞれに固有の特徴があることを確認したのみである。

その傾向はシラスパルーン、バインダの組み合わせでま

ちまちであるため、代表例としてシラスパルーンにFTB、バインダーにセメントを用いたサンプルのフェライト1、3、4、6のもっとも濃度の高いものの材料定数を図11に示す。a)、b)は誘電率のグラフであるが、フェライト3は他に比べてレベルが大きく、また周波数による変化が大きい。一方c)、d)は透磁率のグラフであるが、これと違う傾向を示したのはフェライト3ではなくフェライト1である。周波数の低い部分の値が小さいが、他ほど急激な透磁率の低下が起こっていない。

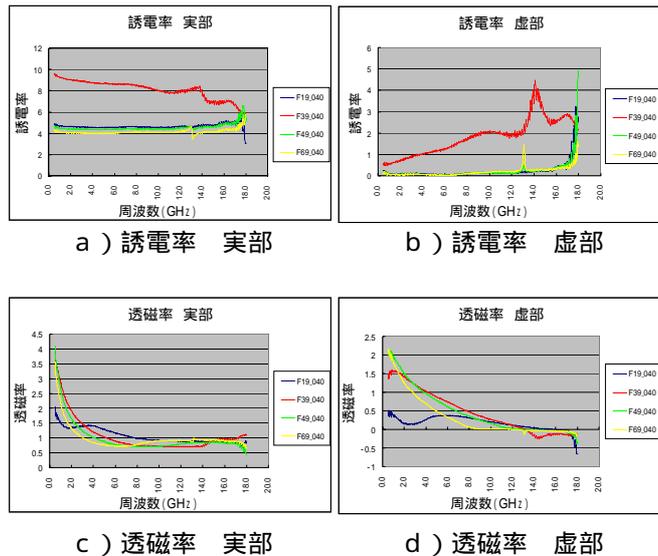


図11 フェライトによる違い

4.5.2 フェライトの濃度による違い

フェライト濃度に関しては、ほぼ一定の傾向を確認できた。大部分に関して濃度が高くなると、材料定数は大きくなる傾向にあった。代表例としてシラスパルーンにSS、バインダーに水ガラス、フェライト1の組み合わせのものの材料定数を図12に示す。a)、b)は誘電率のグラフであるが、濃度が高くなるにつれその値は大きくなっている。また、c)、d)は透磁率のグラフであるが、c)の透磁率実部を見ると低い周波数では濃度の高い方が値が大きい、周波数が大きくなるにつれて急速に値が低くなり、ついにはその値が逆転している。これはフェライト素材によく見られる周波数分散と呼ばれる現象である。

4.5.3 シラスパルーンとバインダーによる違い

シラスパルーンとバインダーの違いによる傾向もやや掴めたが、総合的に考えるとフェライト、バインダー、シラスパルーンの組み合わせで違う特性を持つと判断できる。

一例としてフェライト1と3の2種類、シラスパルーン2種類、バインダー2種類の8計パターンについての材料定数を図13に示す。a)、c)、e)はフェライト1でb)、d)、f)はフェライト3である。

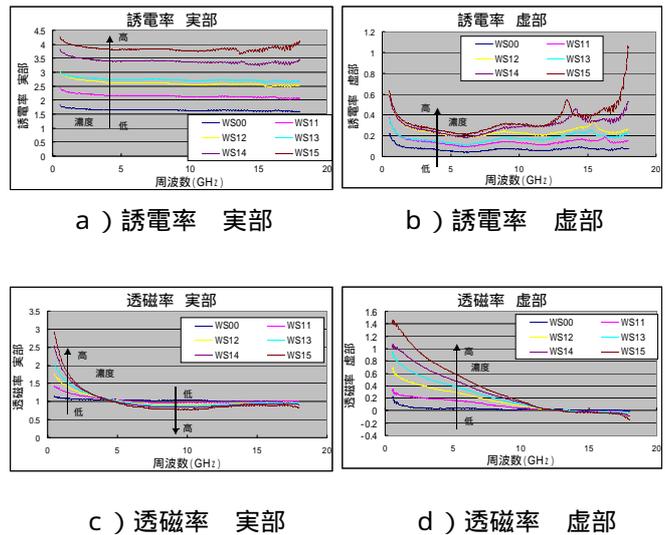


図12 フェライト濃度による違い

フェライト3について見ると、b)とf)は明らかにバインダーの差によるものである。d)は区別が付きづらいほどである。これらから、バインダーにより周波数特性に変化が起ることと、SSよりFTBの方が、つまり粒子径の小さな方が材料定数が大きくなる傾向が見られる。一方フェライト1について見ると、同様な傾向も確認できるが、セメントをバインダーに用いた場合、シラスパルーンの粒子径にはほとんど影響されないことも伺える。

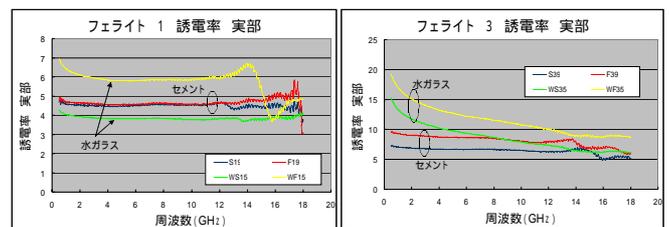
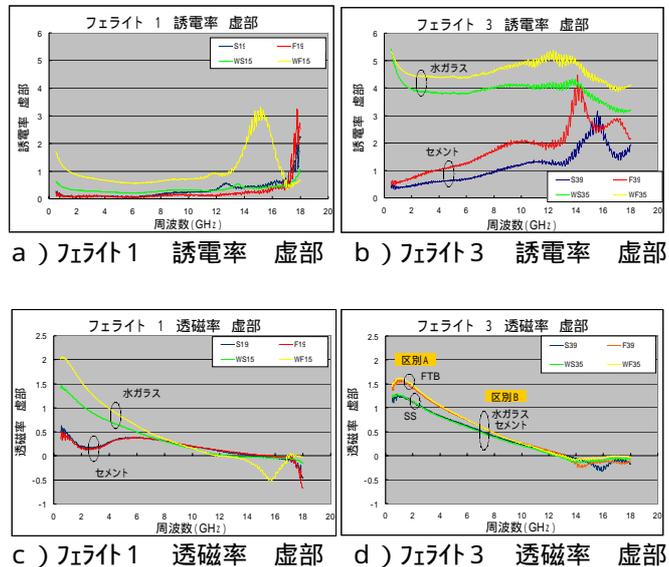


図13 シラスパルーンとバインダーによる違い

4.5.4 考察とまとめ

以上の測定において、各素材の材料定数を確定できた。

これらの素材は、すべて吸収素材であるフェライトを含有しており、何らかの電波吸収効果があることは明らかである。それぞれに特徴を持っており、電波吸収体を試作するにあたってはその厚さにより、吸収レベル、ピーク周波数が変化する。また、多層に積層することも考えると、その組み合わせで様々な特徴を見ることができると考える。

一般にフェライトなどの磁性体材料を吸収材料に用いた場合、誘電率は周波数に対する変化が小さく、ほぼ一定であり、透磁率の周波数特性の制御によってその性能が決まってくるといわれている。また、透磁率の虚部がエネルギーを熱に変える損失部分となるため、その虚部が大きいことが望ましいとされている⁷⁾。

フェライト、シラスパルーン、バインダーのすべての組み合わせで、フェライトの含有量が最も大きいものすべてのサンプルについて、透磁率虚部の周波数特性を図14に示す。これを見ると、フェライト5、6の透磁率虚部は他に比べてやや低いことがわかる。

以上のことから、電波吸収体のシミュレーションではフェライト1、3、4を使用し、水ガラス、FTBを中心にフェライトができるだけ少ない状態で目標とする周波数帯にピークを持っていくように検討を行うこととした。

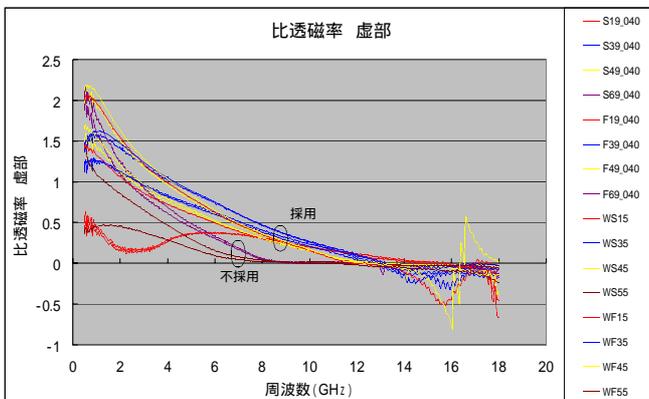
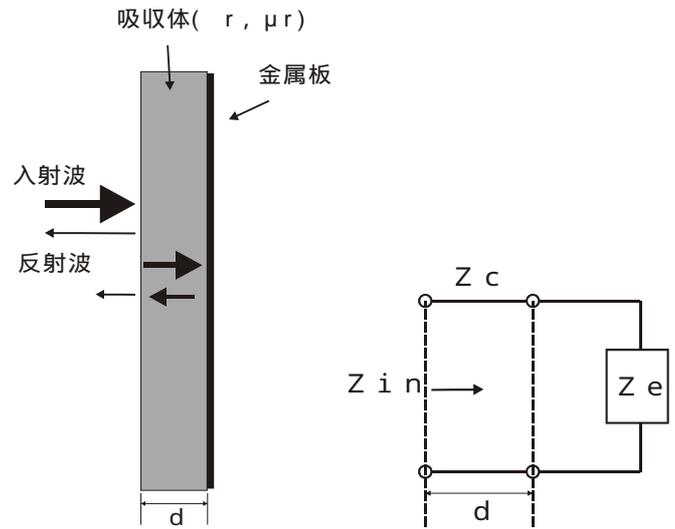


図14 サンプルの透磁率比較

5. シミュレーション

平板の単層電波吸収体は、図15のa)に示すように材料定数が r 、 μr 、厚さ d の素材で、入射側の反対面に金属板（反射板）を裏打ちしてある。これに電波が入射すると一部は表面で反射し、残りが吸収体内部に取り込まれ、多重反射しながら減衰していく。吸収性能を向上させるには表面での反射をできるだけ少なくし、多くの電波を吸収体内部に取り込むことが肝心である。

この電波吸収体を分布定数線路に置き換えると図15のb)のようになる。このように終端にインピーダンス Z_e



a) 平板型単層電波吸収体

b) 分布定数線路

図15 平板型単層電波吸収体と分布定数線路

の負荷を接続した特性インピーダンス Z_c の分布定数線路において終端から距離 d の位置にある点から終端側を見込んだインピーダンス Z_{in} は伝搬定数を c とすれば

$$Z_{in} = Z_c \cdot \frac{Z_e + Z_c \tanh c \cdot d}{Z_c + Z_e \tanh c \cdot d} \quad (8)$$

となる。ここで電波吸収体の特性インピーダンス Z_c 、および伝搬定数 c は

$$Z_c = Z_0 \cdot \sqrt{\left(\frac{\mu r}{r} \right)} \quad (9)$$

$$c = j^2 \frac{1}{(\mu r \cdot r)} \quad (10)$$

と表すことができる。さらに図15のa)のモデルで、 Z_e は金属板の特性インピーダンスであるから $Z_e = 0$ となる。(8)、(9)、(10)式により

$$Z_{in} = Z_0 \cdot \sqrt{\left(\frac{\mu r}{r} \right)} \tanh(j^2 d \frac{1}{(\mu r \cdot r)}) \quad (11)$$

となる。

ここで、反射係数 S は

$$S = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (12)$$

で表され、これをできるだけ0に近づけるよう d を調整する。多層の吸収体に関してもこの理論を拡張することで対応可能である^{4), 5)}。

平板型電波吸収体の設計には、この理論に基づいて作製されている愛媛県工業技術センター作製のソフトウェアを用いた。このソフトウェアは材料定数を入力すると減衰率

を計算し、周波数を軸としてグラフ化することができる。さらに斜入射、多層構造（3層まで）にも対応しており、設計が容易である。

得られた材料定数を基に、本ソフトで電波吸収体の設計を行った。この結果5.8GHzをカバーし、その周辺周波数で良好な電波吸収特性を有する組み合わせを3層構造において見い出した。

設計した電波吸収体の組成を表10に、イメージを図16に示す。

表10 平板型電波吸収体配合比

	層	管理番号	厚み(mm)
多層	1	WS00	10
	2	WS43	7
	3	WS33	6.5

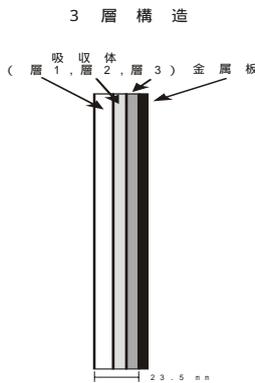


図16 平板型電波吸収体イメージ図

ここで、電波吸収体の濃度、厚さにより吸収量がどのように変化するかシミュレーションした結果をそれぞれ図17、図18に示す。これらの傾向は、どのサンプルでも似ているため、代表例として管理番号WS3xを用いたもので示す。

濃度の変化については、濃度が高くなるほどそのピークが周波数の低い方へシフトしていく。また、吸収レベルのピークは濃度が高いほど大きいとは限らないことが伺える。(厚さ：5mm)

厚さの変化については、厚くなるほどそのピークが周波数の低い方へシフトしていく。また、吸収レベルのピークは厚いほど大きくなるのが伺える。

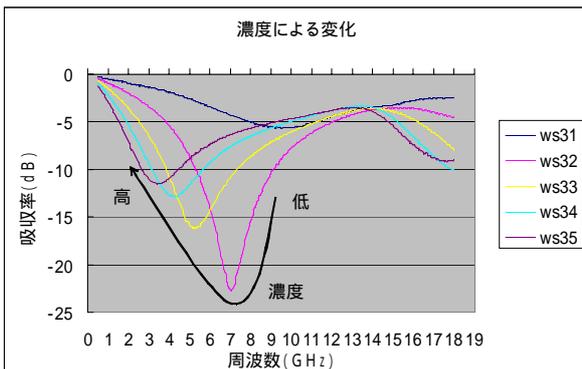


図17 濃度による周波数特性の変化

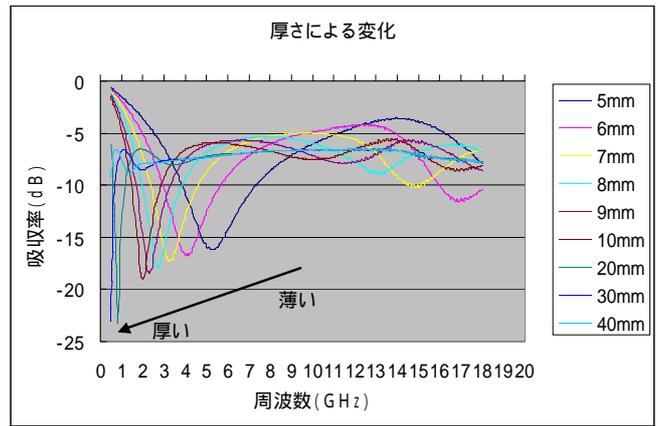


図18 厚さによる周波数特性の変化

6. 電波吸収体の試作

設計データを基に、下記の要領で作製した。

- 1) 材料を配合する。
- 2) 必要量の素材を型に流し込む。
- 3) プレスする。
- 4) 次層があるときは1～3を繰り返す。

型は鉄製で、大きさは22cm x 22cm x 5cmの直方体用である。シミュレーションによると、素材の厚みが吸収に大きく影響することが確認できている。そこでスペーサーを用意し、所定の厚みになるようにプレスした。また、測定のために同じ物を4枚作製し、それを並べたときに底面積が44cm x 44cmになるようにした。

7. 電波吸収特性の測定

7.1 測定方法

アーチ法と呼ばれる空間測定法を利用した。この測定にはネットワークアナライザを用いる。図19に示すとおり、そのPort 1とPort 2にケーブルを接続し、さらにそのケーブル端にアンテナを取り付ける。一方のアンテナから電磁波を送信し、中央に設置されたサンプルとその下に置かれた金属板で反射させ、もう一方のアンテナで受信することで減衰率を測定する手法である。送信アンテナから受信アンテナへの直接の電波や、測定室の乱反射等は、測定距離から求められる電波の到達時間を中心にゲートをかけて排除する。

まず、中央に金属板だけを設置し、基準となる測定系の減衰率を測定する。次に金属板の上に電波吸収体を設置し、同様に減衰率を測定する。このデータから最初に測定した基準となるデータを差し引けばサンプルの減衰率を算出することができる。使用した機器を表5に示す。

本アーチ法では、アンテナを2つ使用するため、物理的に垂直入射はできない。アンテナを地面に対して15度、30度、45度の3通りで斜入射測定を行った。

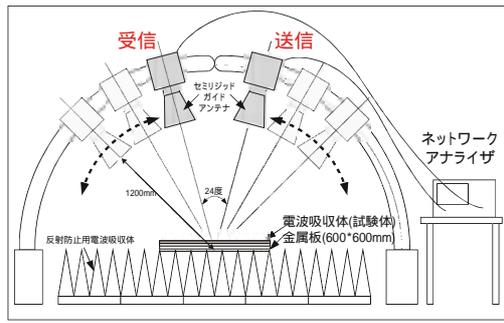


図19 アーチ法イメージ図

7.2 測定結果と考察

測定結果を図20に示す。これを見るとシミュレーションと実測値にかなり開きがある。ピークがずれていることから材料の厚みによる影響が大きいと考え、作製したサンプルの各層の厚みについて実測してみた。その結果、設計の値に比べてやや薄く仕上がっていた。試作した電波吸収体の厚みの実測値を表11に示す。実際の厚みを基に、再びシミュレーションを行った結果、吸収の度合いはやや違うものの、5.8GHz付近において実測値とほぼ同様なシミュレーション結果が得られた。また、斜入射の角度が大きくなると、シミュレーションとの差が大きくなっていくことが確認された。この原因としては、角度が大きくなると送信アンテナから受信アンテナへ直接電波が入り込むためと考え

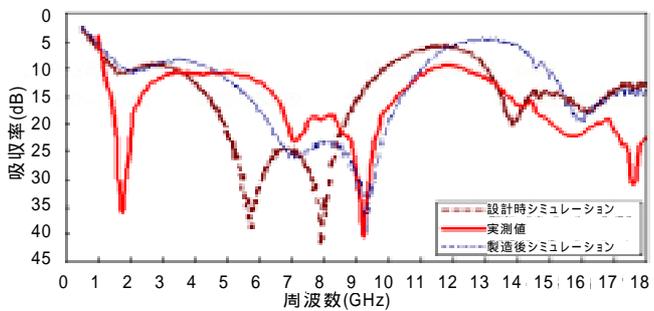


図20 平板型吸収体測定値

表11 試作時の厚みの誤差

層	管理番号	設計厚み(mm)	実測厚み(mm)
1	WS00	10	9
2	WS43	7	7
3	WS33	6.5	5.5

られる。さらに、作製した電波吸収体の大きさが44cm角とやや小さいことも一要因となっていると考えられる。

8. 結 言

本研究により、電波吸収素材であるフェライト粉末と、鹿児島県内で生産され、軽量で耐熱性に優れているシラスバルーンを用いて複合フェライトETC用平板電波吸収体が開発できた。製造時の層厚制御が難しく、所望の厚みに作製することが出来なかったため、当初のシミュレーション結果と大幅にずれてしまったが、作製した電波吸収体の厚みを基に再度シミュレーションを行った結果、実測値にほぼ近い結果が得られた。また、吸収体作製時の問題はあものの、シミュレーションまでの設計技術、つまり電波吸収体用のテストピースの作製技術、電気特性の評価技術、シミュレーション技術を確立できた。今後は企業との共同研究等により具体的な商品化を目指す。

謝 辞

研究を進めるに当たり、有益な助言を賜りました東京都立産業技術研究所 山田万寿雄氏、並びに測定にご協力いただいた岡山県工業技術センター 青山 勝氏、またシミュレーションソフトを使わせていただきました愛媛県工業技術センター 倉橋真司氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1)内藤, 末武: "多段形電波吸収壁の一構成法" 信学誌, 48, 90(1965)
- 2)千野, 山本, 菊池, 押本: "薄膜電波吸収体の設計条件" 信学技報, 87, 402, EMCJ87-94, 55(1988)
- 3)内藤, 末武, 藤原, 佐藤: "フェライト電波吸収壁の設計理論" 信学論, 52-B, 1, 26(1969)
- 4)清水康敬: "最新電磁波の吸収と遮蔽", 日経技術図書(株)(1999)
- 5)橋本修: "電波吸収体入門", 森北出版(株)(1997)
- 6)橋本修(監修): "新電波吸収体の最新技術と応用", (株)シーエムシー(1999)
- 7)青山勝: "電波吸収体の電磁気特性に関する研究", 岡山県工業技術センター報告, 22, (1994)