論説

Paper

電磁波吸収シートによる導波管内の電磁波伝搬の減衰効果

筒井和久^{*}，遠藤博司^{*}，齋藤章彦^{*}

Attenuation of Electromagnetic Waves Propagating in Waveguides by Electromagnetic Wave Absorbing Sheets

Kazuhisa Tsutsui, Hiroshi Endo, and Akihiko Saito

Synopsis

As the operating frequency becomes much higher, the electromagnetic interference turns to the critical issue in the metal cases of electronic devices. The electromagnetic wave absorber has been mounted on the cases in order to suppress the interference. Authors measured the attenuation of the electromagnetic wave in the waveguides simulating the metal case, lined with the synthetic rubber absorber, 0.5 to 3mm in thickness, bearing Fe-7Cr-9Al soft-magnetic powder, 15 micrometer in diameter and 8 to 40% in volume. The reflection losses of the rubber absorbers were also measured and compared with the attenuation. In 10GHz, the both losses reach maximum at the 25vol% and 1.5 /1.7mm thick sheet. However, the attenuation and reflection losses show different characteristics in 22GHz and 28GHz. In 22GHz, although the reflection loss reach maximum at the 12 vol.% and 1.1mm thick sheet, the maximum attenuation is at the 20 vol.% and 1.1mm thick sheet. In 28GHz, although the reflection loss reach maximum at the 23 vol.% and 0.7mm thick sheet, but the maximum attenuation is at the 35 vol.% and 0.7mm thick sheet. The results imply the design of the absorber should be based on the fine and delicate analysis of the suppression of the interference in the metal cases.

1 . 緒 言

1.1 電磁波吸収シートについて

電磁波吸収体は，電波暗室の壁面やテレビのゴースト防止用としてビルの壁面等にも使用されてきた．いずれも遠方からの平面波を対象としたもので，電磁波吸収体の裏面に金属板を配し，吸収体内部で多重反射を生じさせ，前面への総反射を低減させるものである．最近では，カーボン粒子やソフトフェライト（スピネル型）粒子¹⁾，ハードフェライト（六方晶系）粒子²⁾，金属軟磁性粉末³⁻⁵⁾等をゴムや樹脂に混ぜてシート状にした電磁波吸収シートが開発されている．電磁波吸収シートは，いずれも薄型で，高い損失を有し，電磁波エネルギーを熱に変換（吸収）できることから，様々な周波数用途での使用が検討されている．

これらの電磁波吸収シートは，一般に自由空間法や導波管法あるいは同軸管法による反射減衰量により評価される．すなわち，電磁波吸収シートの裏面に金属板を配し，表

面より平面波を垂直に入射したときの反射が，金属板のみの場合に比べて，どの程度減衰するかを測定する方法が採られている．本論文では，この減衰量を反射減衰量と呼ぶ．

1.2 筐体内部干渉について

近年，デジタル電子機器が急速な普及し，不要電波が問題となってきた．これらの不要電波は周辺機器に悪影響を与える．従来の真空管やトランジスタなどを使った電子機器と異なり，最近の電子機器は外部からの電波に敏感であり，微弱な外来電波に対して誤作動を起こしたり，壊れたりするケースが報告されている⁶⁾．パソコン等の動作クロック周波数の高速化に伴い，マイクロ波帯でのEMCも問題になっている．その一方で電磁波利用の拡大が進み，使用される周波数帯も以前に比べると格段に広い範囲になりつつある．これまでは船舶・航空機無線やラジオ・テレビ放送でMHz帯の利用が主であったが，携帯電話，衛星放送等，GHz帯の利用が進んでいる．

このような使用周波数の高周波化に伴い、筐体内部においても電磁干渉が問題となってきた。高周波化により、筐体の大きさに比べて波長が十分に短くなると、内部の回路や素子等から発生した電磁波が、筐体内部空間を伝搬する。Fig.1 に高周波増幅器での例を示す。高周波増幅器では、筐体内部空間をラインから発生した電磁波が伝搬し、入出力間の結合が発生する。この結合によりアンプの発振やアンプゲインの不安定化を引き起こすとして問題となっている。

この筐体内部の電磁波の伝搬対策として、電磁波吸収シートを筐体へ貼付し、筐体内部での電磁波の伝搬を減衰させる手法が検討されている^{7),8),9)}。しかしながら、筐体内部の電磁波伝搬防止対策としての電磁波吸収シートの有効性については確認されているものの、詳細なメカニズムは明確でなく、また最適設計手法も確立されていない。

Fig. 1. Counterplan for coupling in an amplifier module

1.3 本研究の目的

一般に電磁波吸収シートは、前述のように遠方界からの平面波を対象とした反射減衰量を基に設計、評価されるが、この手法で最適化された電磁波吸収シートが、筐体内部を伝搬する電磁波の抑制にどの程度有効であるかは、明らかではない。

本論文では、反射減衰量を基に最適化された電磁波吸収シートが、筐体内部の電磁波の伝搬抑制に対して、どの程度有効であるかの手がかりを得るために、導波管内での減衰量と反射減衰量の比較を行った。多くの高周波増幅器の筐体形状は直方体であり、入力端と出力端の電磁波の結合を考えると、一般の方形導波管形状内のモードの伝搬に類似する。方形導波管の伝搬モードはTE₁₀のみであり、筐体内では高次モードも伝搬に寄与するが、高次モードほど減衰定数は大きく、モードの伝搬にはあまり寄与しないと仮定し、そのドミナントモードであるTE₁₀に対して、電磁波吸収シートの貼付による減衰効果を測定した。すなわ

ち、導波管を筐体と見立て、内部に電磁波吸収ゴムシートを置いた場合の電磁波の伝搬特性と、平面波の垂直入射に対する反射減衰量を測定し、両者を比較した。

2. 実験

2.1 反射減衰量の計算

電磁波吸収シートは、一般にはインピーダンス整合型電磁波吸収体として設計される¹⁰⁾。すなわち Fig.2 に示すように電磁波吸収シートの裏面を金属板で裏打ちし、吸収体内部で多重反射を生じさせ、前面への総反射を低減させるものである。この電磁波吸収シートに電磁波が垂直に入射した場合、電磁波吸収シート前面のインピーダンス Z_{in} は、 $Z_{in} = Z_0 (\mu_r / \epsilon_r)^{1/2} \times \tanh\{(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot d) / c \} \cdot (\mu_r \cdot \epsilon_r)^{1/2}$ (1) で現される。ここで μ_r , ϵ_r はそれぞれ電磁波吸収シートの複素透磁率、複素誘電率、 d は吸収体の板厚、 c は光速、 Z_0 は大気中での特性インピーダンス、 f は入射する電磁波の周波数である。吸収体表面の反射係数は

$$= (Z_{in} - 1) / (Z_{in} + 1) \quad (2)$$

であるから、この時の反射減衰量 (RL) は

$$RL = 20 \cdot \log \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

となる。従って電磁波吸収シートの透磁率、誘電率および板厚が分かれば、反射減衰量は計算にて導出される。

本研究では、10GHz、22GHz、28GHz の各周波数で最大の反射減衰量を持つような透磁率、誘電率、板厚の組み合わせを算出し、これを実現させる金属充填率を次の様に予測した。すなわち、10GHz に対して金属充填率 25vol.%, 板厚 1.5mm、22GHz に対して金属充填率 12vol.%, 板厚 1.1mm、28GHz に対して金属充填率 23vol.%, 板厚 0.7mm とした。

Fig. 2. Impedance matched type absorber.

2.2 電磁波吸収シートの作製

実験には、軟磁性粉末をゴムに混練してシート化した電磁波吸収シートを使用した。Fig.3 にその試作工程を示す。軟磁性粉末にはアトマイズ法により作製した Fe - 7Cr - 9Al (平均粒径 15 μm) を、ゴムは塩素化ポリエチレンを使用した。また、成形性を考慮して炭酸カルシウムを適宜添加した。

アトマイズ法により作製した粉末をミキシングロールでゴムと混練し、カレンダーロールにてシート化した。金属充填率と板厚は、2.1 で予測した各周波数に対する値とした。また各周波数での金属充填率の影響、あるいは板厚の影響を調べるため、粉末の充填率は 8vol.% から 40vol.% の範囲で変化させ、シート厚は、数枚を重ねることにより 0.5mm から 3.0mm の範囲で変化させた。

Fig. 3. Trial manufacturing process of the wave absorber sheet.

2.3 測定方法

2.3.1 反射減衰量測定

反射減衰量は、0 ~ 18GHz では同軸管法を用い、18GHz ~ 40GHz 以上では導波管法を用いて測定した。Fig.4 に測定系の概略図を示す。測定は同軸管または導波管にサンプル

Fig. 4. Schematic diagram of measurement devices of reflection loss

を隙間なく挿入し、裏面を金属板で裏打ちした状態で、表面側より平面波を垂直入射させ、ネットワークアナライザにより反射減衰量を測定した。Table.1 に使用した同軸管および導波管を示す。

2.3.2 導波管内減衰量測定

筐体内部での電磁波の伝搬を擬似的に評価するため、Fig.5 に示す測定系を用いた。導波管内に電磁波吸収シートを配置し、この状態でネットワークアナライザ (HP8510C) を用いて透過減衰量を測定した。測定に使用した導波管とサンプルサイズを Table 2 に示す。以後、電磁波吸収シートの長さ (cm) 当たりの透過減衰量を導波管内減衰量と呼ぶ。本測定は、Fig.1 の様な筐体内部の電磁波の伝搬に対し、導波管を筐体に、またネットワークアナライザの1ポートから入射される電磁波を筐体内部を伝搬する電磁波に対応させモデル化したものであり、電磁波

Table 1. The size of coaxial air line and waveguides for measurement of reflection loss.

Frequency range(GHz)	Fixture	Size (mm)	Length (mm)	Sample size (mm)
0.5 ~ 18	Coaxial air line	7.00 × 3.04	5	7.00 × 3.04 × t
18 ~ 26.5	waveguide (WRJ-220)	10.67 × 4.32	5	10.67 × 4.32 × t
26.5 ~ 40	waveguide (WRJ-260)	7.11 × 3.56	5	7.11 × 3.56 × t

t :thickness of sample

Table 2. The size of waveguides and samples for measurement of waveguide attenuation.

Form of waveguide	Frequency range (GHz)	Width × Height (mm)	Length (mm)	Sample size (mm)
WRJ-10	7 ~ 15	22.9 × 10.2	270	22.8 × 100 × t
WRJ-220	18 ~ 26.5	10.668 × 4.318	70	10.5 × 70 × t
WRJ-260	26.5 ~ 40	7.112 × 3.556	50	7.0 × 50 × t

t :thickness of sample

吸収シートの挿入による電磁波の減衰効果を調べることを目的とした。測定は吸収シートが無い場合を基準とし、吸収シートを配置した場合の透過減衰量 (S_{21}) を測定した。

Fig. 5. Schematic diagram of measurement devices of waveguide attenuation.

3. 結果および考察

3.1 10GHz 帯での減衰効果

まず 10GHz 帯での反射減衰量と導波管内減衰量の比較実験を行った。実験の結果を Fig.6 に示す。10GHz で最適な反射減衰量を持つ条件は、金属充填率 25vol.%, 板厚 1.5mm と予測されたため、ここでは金属充填量を 25vol.% とし、板厚を 1.3 ~ 3.0mm の間で変化させた。また板厚 1.5mm の電磁波吸収シートの μ_r , ϵ_r を測定し、(1) ~ (3) 式により求めた計算値もプロットした。

金属充填率 25vol.% 板厚 1.5mm としたシートの反射減衰量は、10GHz で最大の反射減衰量となり計算値と良い一致を示す。反射減衰量は、板厚が厚くなるに従いピークが低周波側にシフトする。この場合金属充填率一定であるから、 μ_r , ϵ_r はすべてのサンプルで一定であり、(1) 式からも板厚増加によるピークの低周波化が予測され、測定結果と一致する。

一方、導波管内に電磁波吸収シートを配置した場合の結果を見ると、板厚の増大に従い、最大吸収点が低周波側へとシフトし、反射減衰量の場合とほぼ同様の傾向を示す。また反射減衰量に比べ、そのピークがブロード化していることも確認される。

Fig.7 は 10GHz での反射減衰量および導波管内減衰量の

値と、板厚との関係を示す。10GHz 用電磁波吸収シートとして最適な板厚は、反射減衰量で考えると 1.5mm であり、導波管内減衰量では 1.7mm で最大の減衰となる。その最適厚にわずかな差はあるものの、その傾向は両者で一致している。

次に金属充填量に対する依存性を調査するため、金属充填率を変化させ同様の実験を行った。実験は板厚を 1.5mm 一定とし、金属充填率を 20vol.% から 40vol.% まで変化させた。結果を Fig.8 に示す。反射減衰量は板厚を変化させた場合と同様に、金属充填率が多くなるに従い吸収ピークが低周波側へとシフトする。これは金属充填率を多くすると、シートの μ_r , ϵ_r が共に増大するため、式 (1) に従った変化である。一方、導波管内減衰量は、金属充填率を多くするに従いピークは低周波側へとシフトし、この場合も Fig.6 同様、反射減衰量と同じ傾向を示す。

Fig.9 は 10GHz での反射減衰量および導波管内減衰量の

Fig. 6. Thickness dependence of (a) reflection loss and (b) waveguide attenuation in the range of 7 ~ 15GHz.

Fig. 7 Thickness dependence of (a) reflection loss and (b) waveguide attenuation at 10GHz.

Fig. 8. Vol.% dependence of (a) reflection loss and (b) waveguide attenuation in the range of 7 ~ 15GHz.

Fig. 9. Vol.% dependence of (a) reflection loss and (b) waveguide attenuation at 10GHz.

値と、金属充填率との関係を示す。反射減衰量、導波管内減衰量は 25vol.% の金属充填率で最大の減衰量を示し、ほぼ同様の变化を示す。

以上のことから、10GHz 付近の周波数帯では、反射減衰量と導波管内減衰量の金属充填率依存性および板厚依存性は良い一致を示すことが分かる。

3.2 22GHz, 28GHz での減衰効果

22GHz および 28GHz において同様の実験を行った。22GHz は加入者系無線アクセスシステム用として開放されている周波数であり、高周波アンプにおける入出力間結合が問題となっている周波数である。

予測による 22GHz, 28GHz で最大の反射減衰量が得られる条件は、それぞれ金属充填率 12vol.%, 板厚 1.1mm および金属充填率 23vol.%, 板厚 0.7mm であった。なお、これらの試作材の μ_r , ϵ_r からの反射減衰量計算値と実測値とは、この周波数でも良く一致していることを確認した。

まず、金属充填率を 12vol.% として、板厚を 0.9mm から 2.6mm まで変化させ、22GHz における反射減衰量と導波管内減衰量の比較実験を実施した。結果を Fig.10 に示す。この周波数でも反射減衰量は板厚依存性を持っており、計

算による予測通り，最適板厚 1.1mm で最大の減衰量を示し，板厚がそれよりずれるとその減衰量は大きく減少する．これに対し導波管内減衰量の結果を見ると，板厚 1.3mm までは板厚の増大に伴い減衰量は急激に増大し，その後も板厚の増大に伴い緩やかに増大する．この変化は反射減衰量とは明らかに異なっている．

Fig.11 に，28GHz において同様の実験を行った場合の結果を示す．ここでは金属充填量を 23vol.% で一定とし，板厚を 0.5mm から 1.8mm まで変化させた．結果はほぼ 22GHz の場合と同様の傾向を示し，反射減衰量と導波管内減衰量の金属充填率依存性は異なっている．

Fig.12 に，板厚を 1.1mm 一定とし，金属充填率を 8vol.% から 30vol.% まで変化させた場合の 22GHz における反射減衰量と導波管内減衰量を示す．反射減衰量で考えた場合，最適金属充填率は 12vol.% となるが，導波管内減衰量で考えた場合の最適金属充填率は 20vol.% であり，両者の最適点は異なっている．

Fig.13 に，28GHz での金属充填量に対する反射減衰量と導波管内減衰量を示す．板厚は 0.7mm 一定とし，金属充填率を 17vol.% から 40vol.% まで変化させた．反射減衰量では 23vol.% で最大の減衰量を示すのに対し，導波管減衰量では 35vol.% で最大の減衰量となり，ここでも両者の最適金属充填率は異なっている．

これらより，22GHz，28GHz では，反射減衰量と導波管減衰量の変化は，板厚依存性，金属充填率依存性の両方で明らかに異なっている．

以上のように，電磁波吸収シート的设计パラメータである板厚と金属充填率を変化させて，反射減衰量と導波管内減衰量の比較実験を行ったが，周波数により両者の金属充填率依存性，板厚依存性が異なっている場合があることが本実験より明らかとなった．高周波アンブ等，筐体内部干渉が問題となっている実際の機器においては，その形状も様々であり，また電磁波が伝搬する筐体内部の隙間も機器によって異なるため，本研究での導波管内減衰量の結果が，実際の機器内での効果そのものを表したものとは言えない．しかしながら，単純化した導波管での実験においても，反射減衰量と導波管内減衰量の相関が認められないことから，さらに複雑な構造でかつ高次モードの伝搬も予測される実用筐体では，相関が無いことが推測される．

反射減衰量と導波管内減衰量の効果が一致しない要因，および周波数帯によって反射減衰量と導波管内減衰量の関係が異なっている要因は，本研究からは明らかにできなかったが，電磁波のシートへの入射形態の違い，伝搬する

Fig. 10. Thickness dependence of (a) reflection loss and (b) waveguide attenuation at 22GHz.

Fig. 11. Thickness dependence of (a) reflection loss and (b) waveguide attenuation at 28GHz.

Fig. 12. Vol.% dependence of (a) reflection loss and (b) waveguide attenuation at 22GHz.

Fig. 13. Vol.% dependence of (a) reflection loss and (b) waveguide attenuation at 28GHz.

空間の違い等が考えられる。今後電磁波吸収シートによる筐体内部干渉抑制メカニズムを明らかにし、その設計手法を明らかにすることは、実用上、重要な課題といえる。

4. まとめ

本研究では、導波管の内部に電磁波吸収シートを置いた場合の電磁波の伝搬特性を調べた。その結果、反射減衰量と導波管内減衰量が最大となる金属充填率あるいは板厚は、必ずしも一致しないことが分かった。

(1)10GHz 帯では、反射減衰量、導波管内減衰量共に、金属充填率 25vol.%、板厚 1.5 ~ 1.7mm で最も高い減衰量を示す。

(2)22GHz では、反射減衰量は、金属充填率 12vol.%、板厚 1.1mm で最も高い減衰量を示すのに対して、導波管内減衰量は金属充填率 20vol.%、板厚 1.1mm で最大の減衰量となる。

(3)28GHz では、反射減衰量は、金属充填率 23vol.%、板厚 0.7mm で最も高い減衰量を示すのに対して、導波管内減衰量は金属充填率 35vol.%、板厚 0.7mm で最大の減衰量となる。

従って、筐体内の電磁波の伝搬抑制効果と反射減衰量の間には相関が無いことが推測される。今後新たな電磁波吸収体の設計技術確立することが課題である。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、一連の実験の実施に協力していただいた大同特殊鋼(株)技術開発研究所 電磁材料研究部 磁性材料研究チームの小出茂氏、田中申明氏に感謝します。

(文 献)

- 1)内藤 藤原:電子情報通信学会論文誌 B ,53B(1970),537.
- 2)杉本 本間:金属 ,69(1999),722.
- 3)吉田:日本応用磁気学会誌 ,22(1998),1353.
- 4)松本 宮田:日本応用磁気学会誌 ,22(1998),885.
- 5)齋藤 小川 矢萩:電気製鋼 ,69(1998),195.
- 6)不要電波問題対策協議会カタログ
- 7)遠藤 筒井:工業材料 ,48(2000)No.12.
- 8)齋藤 西方:電気情報通信学会総合大会 ,B-4-59(2000-3).
- 9)齋藤 西方:電気製鋼 ,71(2000)279.
- 10)橋本:“電波吸収体入門”,森北出版(1998)