マルチメディア機器への適用のための CFRTP の 電波特性と強度特性の評価* (第2報, CFRTP の電波特性に及ぼす圧縮及び衝撃損傷の影響)

金 東 鎮^{*1}, 村 上 理 一^{*2}

Evaluation of the Characteristics of Electromagnetic Waves of CFRTP for Multimedia Instrument Applications (2nd Report, Effects of Compressive and Impact Damage on Shielding Effectiveness of Carbon Fiber-Reinforced Thermo Plastics against an Electromagnetic Wave)

Dongjin-KIM and Ri-ichi MURAKAMI

The need for plastic composites increases with the increasing use of electronic instruments such as robots, personal computers and cellular phones come into wider use. Carbon fiber-reinforced thermo plastic, CFRTP, is one plastic composite used for electronic instruments. It is favored as a casing for multimedia instruments because it has good deformation and recycling capabilities. It is important to study the shielding effectiveness, SE, of CFRTP against electromagnetic radiation. In the present paper, the shielding effectiveness was experimentally investigated in an electronic shielding room for the CFRTP of which the resin materials were varied in PC, PP, PEI, PMMA and PA. The effects of compressive and impact damage on the shielding effectiveness were studied when the carbon fiber orientation and the space between fiber bundles were changed. The shielding effectiveness strongly depended on the orientation of the carbon fiber. It also decreased when the space between the fiber bundles was increased but was scarcely influenced by the resin materials. When the CFRTP formed a compressive trace on the plate surface by compressive load, the shielding effectiveness increased when the compressive load was increased, and thus depended on the shape of compressive trace.

Key Words: CFRTP, Carbon Fiber Orientation, Space of Fiber Bundle, Compressive Damage, Impact Damage, Shielding Effectiveness of Electromagnetic Waves

1. 結 言

最近の高度情報社会では、マルチメディア通信市場の急速な拡大に伴い、電磁波集密度が増加して電磁波環境を悪くするとともにロボット、パソコン及び携帯電話などの電子機器に電磁波障害を引き起こす可能性がある。そこで、これらの電子機器が電磁波障害を受けずに正常に作動することが求められている。電磁波障害に対する対策は、機器が外部からの電磁波ノイズの影響を受けないように講じられることが一般的であるが、機器自らが発生させたノイズが他の機器に悪い影響を与えないように最初から対策を講じることも重要である。そのため、電磁波ノイズを積極的に遮蔽または吸収する素材の開発が求められている⁽¹⁾。電子機器の筐体にはプラスチック系複合材料が多く使われている。その中で、炭素繊維強化熱可塑性複合材料 CFRTP は電子機器の構成素材、特に筐体に使用される可能性が高い⁽²⁾。前報⁽³⁾において、CFRTP はガラス繊維及びチタン酸カリウムウイスキー強化複合材料に比べて電磁波ノイズの遮蔽効果に優れ、アルミ箔にはほぼ匹敵していることを報告した。

本研究では、CFRTP の電磁波ノイズの遮蔽効果に及ぼす圧縮損傷及び衝撃損傷の影響を調べるために、強化繊維に CF、マトリックスレジン を 5 種類、1、2 及び 5 層積層板の CFRTP を用意し、また、CF と GF の積層順序を変えた 5 層ハイブリッド積層板も使用した。特に CFRTP の電磁波遮蔽特性と圧縮及び衝撃損傷の関係を CF 繊維束の配向及び間隔の関わりにおいて検討した。

2. CFRTP による電波の遮蔽

筐体材料が電波を遮蔽することは、材料表面において入射波のほとんどを反射するか、あるいは透過した

Fig.1 Damping mechanism of electromagnetic waves in CFRTP.

* 原稿受付 1997年2月7日.

^{*1} 正員, 徳島大学大学院 (〒770 徳島市南常三島町2-1).

^{*2} 正員, 徳島大学工学部.

電波が材料内部で吸収されるかである。したがって、電波シールド材は電波の反射係数を大きくし、その遮蔽効果は材料の種類、厚さ、周波数、距離、遮蔽不連続性の量と形態に依存する⁽⁴⁾。前報⁽³⁾で報告したように CF/PC 積層板に入射した電波は、材料表面でその一部が反射し、残りが内部に透過する。その透過波の一部は材料内部で導電体である炭素繊維と相互干渉して減衰し、材料裏面に到達した波は反射波と透過波に分かれる。その様子を模式的に示したものが図 1 である。電波の入射量 I は式 (1) のように表される。

$$I = R_1 + D + R_2 + T \quad [\text{dB}] \cdots \cdots (1)$$

ここで、 R_1 は CFRTP の材料表面 (Air/Material) での 1 次反射量、 D は材料内部での減衰量及び R_2 は材料裏面 (M/A) での 2 次反射量であり、 T は CFRTP を透過した電波の透過量である。電波の遮蔽効果 (SE) は入射量と透過量の差になるから、式 (2) のように表示できる。実際には、送・受信アンテナ間に遮蔽材がないときの受信ノイズレベル V_0 と遮蔽材があるときの受信ノイズレベル V の差として評価できる。

$$SE = I - T = R_1 + D + R_2 = V_0 - V \quad [\text{dB}] \cdots \cdots (2)$$

3. 材料及び実験方法

3.1 供試材料 実験に使用した複合材料の強化繊維は、主に市販炭素繊維 (CF) を使い、E-ガラス繊維 (GF) は圧縮損傷の影響を調べるハイブリッド積層板に用いた。マトリックスには PC、PP、PEI、PMMA 及び PA を用いた。試験片は、クロス織物とレジンフィルムの積層板であり、単層板はクロス織物を 2 枚、積層板は単層板を 5 枚積層したものである。試験片の詳細を

Table 1 Test samples used in this study.

No	Reinforcing Fiber	Layers	Matrix	Thick (mm)	Remark
1	CF	1	PC	0.43	Polycarbonate
2	CF	1	PP	0.42	Polypropylene
3	CF	1	PEI	0.41	Polyetherimide
4	CF	1	PMMA	0.34	P.m.methacrylate
5	CF	2	PA	1.00	Polyamide
6	CF	5	PC	2.76	Polycarbonate
7	C/G/C/G/C	5	PC	1.96	Hybrid type
8	G/G/C/G/G	5	PC	2.11	"
9	CF	1	PE		0°/0° (H3, H4)
10	CF	1	PE		90°/90° (V3, V4)
11	CF	1	PE		0°/90° (V3+H3)
12	CF	1	PC	0.20	HM CF/PC (c=0.5)
13	CF	1	PE		Textile (CF-2)
14	CF	1	PE		Textile (CF-6)
15	CF	1	Non		Textile (CFonly)

表 1 にまとめて示した。PAN 系 CF (Toray T300、90 g/m²) 及び E-GF のクロス織物の単層板 (体積含有率 45%) は、この織物 2 枚と厚さ 50 μm のレジンフィルム 2 枚を重ねてホットプレスした。CF/PC の 5 層積層板の場合、単層板 5 枚の間に PC フィルムを 4 枚交互に、またその外側にそれぞれ 2 枚を重ねてホットプレスした。PC 板では、ホットプレスによって 523 K、15 分間の加熱・加圧成形し、PP 板では、ホットプレスによって 473 K、15 分間の加熱・加圧成形した。単層板の厚さは約 0.4 mm であり、5 層積層板は約 2 mm の厚さであった。試験片の寸法はいずれも 120x215 mm の形状で、ホットプレスした板から切り出した。

3.2 実験方法 電磁波ノイズの測定は前報⁽³⁾と同様に行った。その概要は次のとおりである。まず、1 mm 厚さの銅板で作られたシールドボックスの一側面にあけた 100x200 mm の窓に試験片を取り付けた。直径が 20 mm、長さが 250 mm の銅の丸棒で作られたモノポール送信アンテナは、試験片までの距離が近傍界と遠方界の境を示す 150 mm となるようにシールドボックスの中央に設置した⁽⁵⁾。スペクトラムアナライザに ADVANTEST 社製 R3361A 型を用いた。ノイズの増幅器に TR45002 を使い、0.8~1,000 MHz までのノイズを増幅させた。ノイズの記録には、HP7440 の X-Y プロットを使用した。複合材料の電波の遮蔽効果を測定するにあたって、受信アンテナと送信アンテナの距離、 d は 300、500 及び 600 mm の 3 種類に変えた。受信アンテナは、前報⁽³⁾と同様に受信効率を高める正方形銅地板 (250x250 mm) の中央に設置した。発振器から発生させた 9 kHz ~ 2.6 GHz の信号を増幅させて 3 W の出力で送信アンテナから発信させた。試験片を透過したノイズ電波を受信アンテナで受信し、スペクトラムアナライザで解析した。解析した周波数帯域は主に通信機器で使用される 1 MHz ~ 1 GHz の帯域とした。

4. 実験結果及び考察

4.1 電波遮蔽と CF 繊維の方位の関係 電波の遮蔽と CF の配向の関係を調べるために、幅が 1 mm の CF 繊維束を 2 枚のポリエチレンフィルム (厚さ 100 μm) で挟んだ試験片を作った。繊維束の配向は 0°/0° (一方向水平)、90°/90° (一方向垂直) 及び 0°/90° (直交) とした。CF 繊維束の中心距離が 4 mm (CF 繊維束間の隙間、 $c=3$ mm) である試験片について、3 種類の CF 繊維の配向のノイズ線図を図 2 に示した。ノイズレベルが電波の周波数に応じて変化することは前報で示した結果⁽³⁾ とほとんど同じある。電波の遮蔽効果の周波数依存性は用いた測定系のアンテナ長さ (ここでは 300 MHz

の波長の1/4に相当する250 mm)によって変化する。この遮蔽効果が最も大きい 600 MHz 近傍について考える。CF 繊維を $90^\circ/90^\circ$ に配向した V3 の場合に顕著な遮蔽効果が見られた。CF 繊維を $0^\circ/0^\circ$ に配向した H3 の場合には、試験片を挿入しないときのノイズ線図とほとんど同じであり、遮蔽効果は見られなかった。したがって、試験片に入射した電波が平面波であり、電波の振動方向と繊維束の配向が垂直である $90^\circ/90^\circ$ の場合に著しい遮蔽効果が現れる。しかし、繊維束の配向と電波の振動方向が一致する $0^\circ/0^\circ$ の場合には、電波が CF 繊維束の間のレジンをそのまま通過するために遮蔽効果が現れなかったと考えられる。また、CF 繊維を $0^\circ/90^\circ$ に配向した V3/H3 の場合、V3 の場合とほぼ同じ遮蔽効果を示した。これは、V3 と同じ方位に配向した CF 繊維束が電波の遮蔽に寄与したことを示唆して

Fig. 2 Relation between noise diagram and CF orientation (antenna distance, $d=500\text{mm}$).

Fig. 3 Relation between CF orientation and oscillating direction of electromagnetic wave.

いる。しかし、ノイズ線図を詳細にみると、V3/H3 のノイズレベルは 550~650 MHz の帯域において V3 よりも高いレベルにある。以上のことから電波の振動方向と繊維の方位の関係を模式的に示したものが図 3 である。電波と繊維の方位の関係は光の偏光板での現象と極めてよく似ており、CFRTP には強い電波異方性があることになる。したがって、電波を効果的に遮蔽するためには電波の振動方向と CF の方位が 90° になるように繊維を配向することが重要である。しかし、実際に CFRTP を電子機器の筐体に適用する場合、一方向 CF 繊維は、成形時に配向角や間隔を変えるので、電波に対する遮蔽効果が変化することが予想される。クロス織物は $90^\circ/90^\circ$ の一方向繊維とほぼ同じ遮蔽効果を持つことから、成形時の繊維の変形を考慮すると $0^\circ/90^\circ$ のクロス織物を筐体を使用して遮蔽効果の低下を補正することが必要になる。

4・2 CF 繊維束間の隙間の影響 筐体の損傷や成形時に生じた CF 繊維束間の間隔が変化したとき、電波の漏洩に及ぼす影響を調べるために、CF 繊維束の間隔を変化させた試験片について電波ノイズを測定した。繊維配向が $0^\circ/90^\circ$ の試験片では、間隔 c を 0、0.5、2 及び 6 mm に変えると、図 4 に示すようにノイズ線図に明らかな繊維束間隔の影響が現れた。すなわち、 $c=0.5$ mm の HMC/PC は $c=0$ の CF/PC1L 及び CF only のノイズ線図とほぼ同じであるが、 $c=2$ mm になると、ノイズ線図は上方に移動し、さらに $c=6$ mm になれば試験片無しの結果とほぼ一致する。このことは、300 MHz 以上の周波数帯域でもほぼ同様であった。CF 繊維束間隔が試験片の面抵抗を変化させるために電波の透過に影響を及ぼし、その間隔が 6 mm 以上になると面抵抗が自由空間の特性インピーダンスに等しくなるために遮蔽効果がほ

Fig. 4 Effect of interval of CF bundle on noise diagram of noise for CFRTP ($d=600\text{mm}$).

とんど無くなると考えられる⁽⁶⁾。

4・3 圧縮損傷の影響 直径100 mmの鋼球を試験片の上に置き、島津社製 万能圧縮試験機を用いて500から3,000 kgfまで最大荷重を500 kgごとに変えながら、1 mm/minの荷重速度で圧縮して損傷を与えた。その際、試験片の下に120x120x45 mmの角材木を置き、最大圧縮荷重で約1分間保持した。

図5は最大圧縮荷重を3,000 kgfとしたときのCFRTPの圧縮荷重-変位線図を示す。CF/PP、CF/PEI及びCF/PMMAの結果はCF/PC単層板とほぼ一致したので、図中では省略してある。CF/PCの5層板は弾性率が最も高いが、レジンの破壊は単層板の約2,650kgfより少し低い約2,500 kgfの荷重で起こった。しかし、CF/PA 2Lでは、3,000kgf以下の荷重ではレジンであるナイロンに破壊が生じなかった。

図6は最大圧縮荷重の増加に伴うCF/PP 1Lのノイズ線図の変化を示す。このノイズ線図は損傷部と健全部からのものである。圧縮荷重が500 kgf、1,000 kgf及び3,000 kgfと増加すると、圧痕直径は17 mm、21mm及び45 mmと変化した。この圧痕でのCF繊維束の間隔を実体顕微鏡で観察すると、その間隔は圧痕の大きさに関わらずほとんど変化しなかった。この結果は、圧痕における繊維束の間隔よりむしろ圧痕の形状に電波の遮蔽が依存することを示唆している。このとき、圧縮荷重によって圧痕での厚さは減少しており、CF束も横方向に押しつぶされ、結果として繊維束間の間隔に差異が生じなかった。健全な試験片と比較すると、最大圧縮荷重が1,000 kgfまで増加するにつれてノイズ

線図が下方に移動した。しかし、2,000 kgfのノイズ線図を図中表示することは省略したが、1,000 kgfのものとはほとんど同じになった。さらに、3,000 kgfになると、図のように約280~460 MHzの帯域と460~680 MHzの帯域とで異なる効果が現われた。これは、最大圧縮荷重が3,000 kgfになれば、圧痕の深さの増加につれて円形圧痕の縁から対角線方向にしわが生じて大きく変形していたことに起因するものと考えられる。したがって、遮蔽ノイズ線図は周波数帯域によって多少の差異があるけれども、最大遮蔽効果は、最大圧縮荷重が大きいほど増加する傾向にある。このような結果はCF/PC 1Lの場合もほとんど同じであった。

次に、CF/PC 5L積層板及びCF/PC1LとGF/PC1Lを交互に積層したC/G/C/G/C及びG/G/C/G/Gのハイブリッド積層板の結果について述べる。前者の場合、図5に示したようにレジンの破壊開始荷重は低い、圧痕の大きさが圧縮荷重とともに増加することはCF/PC 1Lと同じである。しかし、圧痕に白い炭酸カルシウム粉末を浸透させると、圧痕底に微小なき裂が十字状に観察され、CF積層板の圧痕は単層板と異なるが、電波の遮蔽効果は単層板と大きな差異がなかった。後者のハイブリッド積層板では、CFとGFの積層順序とGFの積層数によって遮蔽効果に差異が生じた。C/G/C/G/C積層板の遮蔽効果はCF/PC 5L積層板とほぼ同じであったが、G/G/C/G/Gのような積層板では、1,500 kgfの荷重で圧縮したときの圧痕の直径が約32 mmで、CF/PC 1Lの約23mmの圧痕より大きく、かつ圧痕の底には大きな十字状の割れが生じていた。GFは電波に透明であることを考慮すると、この積層板は単層板と同じはずであるが、実際

Fig. 5 Diagram of compressive load-displacement for CFRTP.

Fig. 6 Noise diagram of noise level vs frequency with various compressive loads using a 50mm steel ball for CF/PP 1L (d=600mm).

の遮蔽効果は単層板のそれと微妙に異なった。これは、GFの存在が圧縮損傷を拡大したために、結果として遮蔽効果に差異をもたらしたものと考えられる。圧痕の形状はマトリックスによって少し異なった。例えば、1,500 kgfでのPC、PEI及びPMMAの圧痕寸法はそれぞれ約23、約23及び約19 mmであり、いずれの場合も遮蔽効果は図6に示したPPの場合とほぼ同じであった。一方、PAは他の試料に比べて復元性が良いので、圧縮負荷した後約30分以内に圧痕の大部分が消失したため、遮蔽効果は処女材料と大きな差がなかった。表2に示したように電気的特性はレジンによって異なるが⁽⁷⁾、厚さが50 μ m程度のフィルムでは、電気的特性の差が電波の遮蔽効果に大きな影響を及ぼさなかったと言える。

Table 2 Electrical characteristics of resin matrixs⁽⁷⁾.

Matrix	Melting point(K)	Permittivity (μ)	Conductivity (σ, Sm^{-1})
PC	540	3.1	6×10^{-16}
PP	449	2.2	1×10^{-16}
PA-6	496	4.3	1.6×10^{-13}
PA-66	538	3.75	2×10^{-12}
PMMA	433	3.12	6×10^{-15}

4・4 衝撃損傷の影響 図7に衝撃損傷を与えた試験装置の概要を示す。直径11 mmの鋼球を先端に付けた鋼棒に0.7 kgfの重りを載せ、鋼球の落下高さを120及び200 mmに変えて自由落下させた。衝撃損傷は、

Fig. 7 Impact testing apparatus.

同じ落下高さであっても試験片の下に置いた治具の形状によって異なる。ここでは、圧縮損傷を与えたときと同じ角木材(以下Wで表す。)及び外径57 mm、内径50 mm、高さ27 mmの鋼リング(以下Rで表す。)の2種類の治具を用いた。落下高さと同敷き治具を変えたときのCF/PC 1Lのノイズ線図を図8に示す。図中のW20及びR20はそれぞれ試料の下に角材木及び鋼リングを敷き落下高さ200 mmのときの結果を示し、R12は鋼リングを用い、落下高さ120 mmの結果である。鋼リングの場合、落下高さが120 mmでの衝撃損傷は、放射状の微小き裂のみであり、200 mmになると小さなひし形状の衝撃圧痕(対角線長さ14 mm)が形成され、そこには放射状き裂が観察された。角木材の場合、落下高さが120 mmでは衝撃損傷はあまり見られず、200 mmでは小さな円形状の衝撃圧痕(直径約6 mm)が形成された。しかし、この圧痕には微小き裂はほとんど見られなかった。

Fig. 8 Noise diagram of the shock damaged CF/PC 1L (d=300mm).

Fig. 9 Damping of the transmitting wave by the interference of the incident and reflected waves at a hole.

衝撃損傷とノイズ線図を対比させると、R12はR20よりもノイズレベルが高く、大きな衝撃損傷の方が高い遮蔽効果を示した。W12のノイズレベルは処女材のそれ⁽³⁾とはほぼ同じであったので図中表示することは省略した。W20では最も高い遮蔽効果を示した。同じ落下高さでも角木材の方が鋼リングより衝撃圧痕の寸法は大きくなっていた。

結果として衝撃圧痕の大きい方が電波を強く遮蔽し、圧縮損傷の場合と同じ結果になった。マトリックスがPC以外の場合、落下高さを200 mmとして実験した。PAの場合、衝撃損傷はほとんど現れず、ノイズ線図は処女材のそれ⁽³⁾と同じになった。しかし、PEIの場合には、衝撃によって試験片に約10 mmほどの衝撃貫通穴が生じたけれどもノイズレベルは処女材⁽³⁾に比べて大きな差異がなかった。貫通穴に電波が入射すると、図9に示すように、その縁で乱反射が生じる。そこで生じた反射波同士の干渉による振幅の減少(a)、反射波同士の干渉波と入射波との干渉による振幅の減少(b)及び反射波と入射波の干渉による振幅の減少(c)のような現象が生じる⁽⁸⁾。そのために10 mmほどの貫通穴があってもノイズレベルが変化しなかったものと考えられる。

4・5 圧痕形状の影響 ノイズ線図に及ぼす圧痕形状の影響を調べるために島津社製万能圧縮試験機を用いて、100 mmの鋼球を3,000 kgfの圧縮荷重での試験片の中央を圧縮した。圧痕が生じたCF/PC 1Lのノイズ線図を処女材及び試料無しと比較した結果が図10である。図中で入射波に対して圧痕が凹面をOpposite、凸面をFrontと表記した。同じ圧縮損傷を受けた試験片でも圧痕の凹面と凸面とで電波の遮蔽効

Fig.10 Noise diagram of damaged specimens caused by a compression load of 3,000kgf using a 100mm steel ball on a CF/PC 1L(d=500mm).

果に差異が生じた。すなわち、280～450 MHz及び480～670 MHzの周波数帯域では凸面の方が約5 dBほど遮蔽効果大きい。入射波に対して圧痕が凸面になると、スネルの法則により反射角は凹面のそれより大きくなる。しかも平板での反射角も大きいために電波の遮蔽効果が増加したと考えられる。

4・1節で述べたように電波の振動方向が繊維配向角に対して90°のとき遮蔽効果が最大、0°のときに最小になった。これは光の偏光板の現象と類似し、入射光の強さを I_0 、透過光が最大の位置から ϕ だけずれたときの偏光板の透過光の強さ I は式(3)で表される⁽⁹⁾。これを電波と繊維の関係に適用して考えることにする。

$$I = I_0 \cos^2 \phi \cdots \cdots (3)$$

また、電波が平面に入射するとき、入射角により透過厚さが変化する。スネルの法則により透過厚さ t' は入射角を θ 、板厚を t 及び屈折率を n とすると次のようになる⁽⁹⁾。

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \theta}} \cdots \cdots (4)$$

いま、簡単のため屈折率を $n=1$ とすると透過厚さは $t/\cos \theta$ に比例して増加するので、入射角が大きくなるほど透過波が試験片と相互干渉を起こす機会が増えることになる。

平面波が圧痕に垂直に入射する場合を考えると、入射角は圧痕の部位によって異なり、その部位での圧痕の繊維配向角も変化している。電波の反射係数 R は入射角 θ に対して式(5)のように示される⁽¹⁰⁾。

$$R = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \cdots \cdots (5)$$

したがって、圧痕での入射角 θ が大きいと、電波の振動方向と繊維配向角のなす角 ϕ が大きくなり、透過波の強さ I は式(3)から減少することがわかる。しかも式(5)からわかるように入射角 θ の増加につれて電波の反射係数が増大する。さらに材料内部に透過した波は透過厚さが入射角 θ につれて増加するので材料内部での減衰が大きい。このように考えると、凸面の圧痕は凹面に比べて入射角が大きいために高い遮蔽効果を示すことがよく理解できる。

また、4・3節で圧痕が大きいほど電波遮蔽効果が増加することを述べた。これも上述した入射角と反射係数及び電波の振動方向と繊維配向角のなす角 ϕ の変化から説明できる。すなわち、圧痕に平面波が入射すると、入射角はその部位によって変わり、入射角の変化

する範囲は圧痕の深さに依存する。最大に変化する入射角の範囲は圧痕の底での 0° から圧痕の縁での 90° になる。本研究では同じ直径の鋼球を使い、圧縮荷重を変えたので、圧縮荷重の増加は圧痕の曲率を変えず深さのみを大きくする。この場合、圧痕が深いほど入射角の変化幅が大きい。電波の反射係数は、式(5)が示すように入射角が 45° 以上になると急激に増大する。圧痕が深いほど、またその縁に近づくほど電波の振動方向と繊維配向角のなす角 ϕ が大きく、しかも入射角は 45° 以上となり、反射係数も大きくなる。そのため圧痕が大きくなるのに伴って電波の遮蔽効果が増加したことになる。

5. 結 言

本研究では、CFRTPの単層板及び積層板の電波遮蔽効果に及ぼす圧縮及び衝撃損傷の影響を繊維配向角及び繊維束間隔との関わりにおいて検討した。得られた結果を要約すると、次のようになる。

1) CF繊維を一方向に配向した複合材料の場合、電波の振動方向と繊維配向との角度によって遮蔽効果に差異が生じた。すなわち、垂直配向の場合、遮蔽効果が最大になり、水平配向の場合にその効果が消失した。クロス織物では垂直配向での結果とほぼ同じになった。

2) 電波の遮蔽効果は CF繊維束の間隔に強く依存した。繊維束の間隔が 0.5 mm までは、間隔の無い試験片と同じ遮蔽効果を示し、間隔が 6 mm になると、遮蔽効果が無くなった。間隔が 2 mm では、遮蔽効果は 0.5 mm と 6 mm のほぼ中間になった。

3) 圧縮及び衝撃損傷が 電波の遮蔽効果に及ぼす影響は圧痕形状に強く依存した。圧縮及び衝撃荷重が増加すると圧痕が大きくなり、圧痕における電波入射角の変化幅が広がるとともに電波の繊維異方性を強めるため電波の遮蔽効果が増加した。

4) 圧痕形状が電波の遮蔽効果に及ぼす影響は、電波が凸面に入射する方が凹面に入射するより大きくなった。これは電波の入射角が凸面の方が凹面より大きくなることに関係していた。

謝 辞

本研究は(財)機械工業振興財団からの研究助成によるものである。また、著者の一人の派遣を支援して下さった韓国学術振興財団と柳韓専門大学、試料製作に際して住友重機械工業(株)の筑後了治氏及び材料試験機の使用に際して徳島県立工業技術センターの柏木利幸氏と野々村俊夫氏の援助を頂いた。さらに、色々な資料を下さった本学電気電子工学科林則行助教授と測定装置製作に際して本学文部技官近藤正春氏のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 村上理一, STEPテクノ情報, 1-2, (1995), 14.
- 2) 馬場文明, JSME 第57回講習会教材, 先進複合材料の開発動向とその応用の現状, (1993), 24.
- 3) 金東鎮, 村上理一, 日本機械学会論文集, 第62巻 604号(A), (1996), 2817-2822.
- 4) H.B. Yoon, KEES EMC Tech. Seminar, (1990), 26.
- 5) 清水康敬ほか3名, 電磁波の吸収と遮蔽, (1989), 55, 日経技術図書.
- 6) 清水康敬ほか3名, 電磁波の吸収と遮蔽, (1989), 218, 日経技術図書.
- 7) H.B. Kang, Electric & Electronic Materials, (1993), 434-435, Chungmoonkak.
- 8) 有山正孝, 振動・波動, (1995), 223-252, 裳華房.
- 9) 小出昭一郎ほか2人, 物理概論(上), (1983), 153-156, 裳華房.
- 10) 金暎権, 電波工学, (1982), 263, 松園文化社.