導電性フィラーを用いた電磁波シールド材の最近の進歩

高濱 裕 宣* 戸 来 稔 雄**

1. は じ め に

近年、コンピュータ、ワープロ、スイッチング電源等のデジタル技術を応用した製品から発生する電磁波が社会的な問題となっている。米国 FCC(連邦通信委員会)、西独 VDE をはじめとして、欧米各国では電磁波障害(以下 EMI)に対する規制の実施、強化を行っている。わが国では、電気通信技術審議会が、国際無線障害委員会(CISPR)の勧告をもとに昭和56年度から審議を開始し、昭和60年12月、「情報処理装置から発生する妨害波及び妨害高周波電流の許容値及び測定法」に関する技術規格を取りまとめ郵政大臣に答申した。この答申を受けて、郵政省は、関連業界に対して指導という形で段階的な EMI 対策に着手した。通産省の指導のもとに、昭和60年12月、関連4団体は「情報処理装置等電磁波障害自主規制協議会」(VCCI)を設立した。VCCIの許容値は、第1種装置(工業用、商業用として使用されるもの。汎用コンピュータ、業務用ワープロ)、第2種装置(住宅地域で使用されるもの。パソコン、ワープロ)によって異なり、正規許容値を達成するまで暫定期間が設けられている。表1に第2種装置の許容値を示す⁽¹⁾。緩和措置期間も昭和63年11月で終了し、VCCI規制値も完全実施が行われ、電磁波シールド材の開発は最終段階を迎えている。

* (株)スリーディコンポリサーチ研究員

** 新日本製鉄(株)第一技術研究所化学研究センター主幹研究員

Recent Progress in the Electro-magnetic Shielding Materials with Conductive Fillers; Hironobu Takahama*, Toshio Herai** (*Three-D Composites Research Corporation, Tsukuba. **R & D Laboratories-I, Nippon Steel Corp., Kawasaki)

Keywords: *electro-magnetic shielding, composites, filler, conductive, thermoplastics, shielding effectiveness, electro-magnetic interference, percolation, aspect ratio*

1988年12月16日受理

EMI 対策の手段は、以下のように大別され、技術的、経済的に最適な手段が単独あるいは複数を組み合わせて選択される。

- (1) 回路設計での対策(回路パターン設計)⁽²⁾。
- (2) フィルター等の対策部品の付加による対策(おもに伝導性妨害電波に対処)⁽³⁾。
- (3) 電磁波シールド性筐体による対策(放射性妨害電波に対処)。

現在用いられている樹脂製筐体に電磁波シールド性を付与する方法としては、表面に導電性被膜を形成する方法と、プラスチックの中に導電性フィラーを充填する方法がある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。種々の方法の特徴を表2に示す。本稿においてはこの導電性フィラーを充填した成形材料の最近の研究、開発状況について述べる。

2. 電磁波シールドとは

(1) シールド効果の理論

金属板の電磁波シールド効果に対して、Schelkunoff が理論的考察を行っている⁽⁶⁾。

$$\text{シールド効果 (dB)} = \text{反射損失} + \text{吸収損失} + \text{多重反射損失} \quad (1)$$

(a) 反射損失(R)

反射損失とは、電磁波の伝播経路中に媒質の異なる境界面が存在すると、両者の波動インピーダンスが異なるために電波の一部が境界面で反射され進入する電磁波エネルギーが失われる。電界成分が大きい場合(高インピーダンス)と磁界成分が大きい場合(低インピーダンス)とでは損失の程度が異なる。

電界の場合：

$$R(\text{dB}) = 346 + 6 \log_{10}(\sigma/f^3 \cdot \mu \cdot r^2) \quad (2)$$

磁界の場合：

$$R(\text{dB}) = 20 \log_{10}(0.182/r\sqrt{\mu/f \cdot \sigma} + 0.136\sqrt{f \cdot \sigma/\mu} + 0.354) \quad (3)$$

表 1 第 2 種情報装置に対する漏洩電波の許容値.

自主規制ステップ 周波数範囲	61年6月-62年5月に 初めて製造される装置		62年6月-63年11月に 初めて製造される装置		63年12月以降に製造 される装置	
(測定距離)	(10 m)	(3 m)	(10 m)	(3 m)	(10 m)	(3 m)
30 MHz-230 MHz	40 dB	50 dB	34 dB	44 dB	30 dB	40 dB
230 MHz-1000 MHz	47 dB	57 dB	41 dB	51 dB	37 dB	47 dB

注1:1 $\mu\text{V}/\text{m}$ を1 dB とする.

注2:測定距離は30 m, 10 m, 3 m のいずれかひとつでよい.
ただし, 測定距離3 m の値は, 1 m 以下の装置に適用する.

表 2 プラスチックの電磁波シールド方法.

分 類	シールド方法	特 徴
表面処理方法	導電性塗料	①低コスト ②複雑な形状には不均一 ③作業性悪い
	無電界メッキ	①高シールド性 ②高度な技術を要する ③高コスト
	蒸着	①高シールド性 ②複雑形状には不均一 ③高コスト
	亜鉛溶射	①高シールド性 ②作業環境悪い ③密着性悪い
複 合 的 方 法	導電性プラスチック	①低コスト ②従来成形法を踏襲 ③化粧塗装必要

ここで

f : 周波数(Hz)

r : 放射源とシールド材間の距離(m)

σ : 銅に対する比導電率

μ : 銅に対する比透磁率

(b) 吸収損失(A)

吸収損失とは, 電波が媒質中を伝播していく経路中で渦電流としてエネルギーが失われることによるものであり, 媒質中の電磁波に対する電波定数を計算することにより得られる.

$$A(\text{dB}) = 3.34t\sqrt{f \cdot \sigma \cdot \mu} \quad (4)$$

ここで

t : シールド材の厚さ(m)

(c) 多重反射損失(B)

多重反射損失はシールド材内部の両境界面での反射の繰り返しによるものであり, 反射損失と吸収損失の和が十分に大きい場合無視できる.

上記の式から, 電界のシールドを目的とする場合には高電気伝導性材料を, 磁界のシールドには高透磁率材料を用いなければならないことが分かる. しかし, この理論は低周波電磁波に対する金属板のシールドに関するものである. 樹脂内部に導電性フィラーを分散させたシールド材は, 金網に近い構造を有し, しかも1 MHzを越える高周波領域についての適用には若干問題がある. しかしながら, シールド効果と導電性のあいだには密接な関係が知られており, 高い導電性材料を用いることで高い電磁波シールド特性が得られる(図1).

図1 体積固有抵抗とシールド効果.
(平面波, 1 GHz)⁽⁷⁾

(2) パーコレーション理論

樹脂に導電性フィラーを添加することにより, 複合体の電気伝導性, 熱伝導性が大きく変化する⁽⁸⁾. 導電性フィラーを樹脂に混合するとき, 導電性フィラーの充填量を増してゆくと最初, 非常に僅かな体積固有抵抗の減少がみられる. ある臨界充填量(臨界体積分率: V_p^*)で複合体の体積固有抵抗が転移的に減少し, 10桁以上の減少がみられその後再び緩やかな減少に戻る(図2).

この転移的な体積固有抵抗の減少は, 導電性フィラーが樹脂マトリクス中で凝集を開始し, 導体回路を作り始めることに対応している. この回路ができる現象をパーコレーションと称する. V_p^* は, 樹脂内での導電性フィラーの分散状態の変化を示す. V_p^* の導電率への影響に関する理論計算としてはモンテカルロ法⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾, 確率計

図2 体積固有抵抗の体積分率依存性⁽⁹⁾

算法⁽¹²⁾⁽¹³⁾, 統計的解析⁽¹⁴⁾等が行われている。その結果, V_f^* は導電性フィラーのアスペクト比(長さ/径)の自乗に逆比例する⁽¹⁰⁾。

$$V_f^* \propto (1/\text{アスペクト比})^2 \quad (5)$$

従って, 分散させる導電性フィラーの形状は, 粉末よりも箔, 箔よりも繊維のほうがより少ない添加量で十分な導電性が得られる。

V_f^* は, 使用する樹脂の物性によっても変化する。樹脂の接着性が高いほど, V_f^* は増大する。これは, 接着性が高いと導電性フィラーの界面を濡らし接触抵抗を増大させる⁽⁹⁾⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾だけでなく, 樹脂との混練時にフィラーの構造破壊が起こるためである⁽¹⁷⁾。樹脂の粘度が高い場合も, V_f^* は増大する⁽¹⁸⁾。これは高い粘度のために, 樹脂との混練時に繊維破損を引き起こすためである。樹脂の結晶化が V_f^* の増加を引き起こすことも知られている⁽¹⁹⁾⁻⁽²¹⁾。

導電性粉末が均一分散した場合の, 理論 V_f^* 値は35体積%である。樹脂の粒子径と導電性粉末の粒子径を一定比に保ち, 凝集構造を持たせて複合体を成形した場合, V_f^* 値は5体積%まで低減することができる⁽¹⁹⁾。導電性炭素粉末ケッチェンブラックは, 他の炭素粉末と比較して, 極端に少ない添加量で優れた導電性を発現する。これは樹脂との混練成形後も, ケッチェンブラックが特異な高次構造を保ち得ることによるものである⁽²²⁾。導電性シールド材の開発においては, 導電性フィラーの均一な分散よりも, 効率のよい電気的回路の形成こそ必要となる。

以上のことから導電性フィラーとしては,

- (1) アスペクト比の高い繊維形状をしたもの。
- (2) 成形工程で凝集構造が破損しないもの。
- (3) 金属並の導電性を有するもの。

に絞られる。しかし, 優れた電磁波シールド材を開発するうえで, 最適な導電性フィラーの選択のみならず, マトリクスとなる樹脂の選択, 樹脂との混練法を含めた成形法についても検討を加えなければならない。

3. 成形法

(1) コンパウンド方式

より少ない繊維の混入量でより良い導電性を持たせるためには可能な限り長い繊維状のフィラーを混入することが望ましい。しかし, 樹脂に金属繊維を練り込むコンパウンド方式を採用した場合, 押出機, 射出成形機2段階のスクリュウ剪断を受け, 成形品中の金属繊維は破断し, 高いアスペクト比を保てない⁽²³⁾⁽²⁴⁾ (図3)。

図3 コンパウンド方式の工程。

(2) マスターペレット方式

マスターペレット方式は, 連続繊維に樹脂を連続含浸させた後, 任意の長さに切断しマスターペレットを製造する。このマスターペレットは, ペレット長とほぼ等しい長さの金属繊維を高密度に含有し, これを一般樹脂ペレットと混合し, 射出成形内で分散させ成形する。この方式によれば, スクリューの混練が一度で済み, 成形品中により長い繊維を保つことができる⁽⁷⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾ (図4)。

図4 マスターペレット方式の工程。

4. 各種導電フィラー

電磁波シールド成形材料の要求特性としては, 電界の

シールド効果が 40 dB 以上、アイゾット衝撃強さ(ノッチ付)0.8 Nm/cm 以上、および在来の金型および成形機がそのまま使用できることである⁽²⁷⁾。40 dB のシールド効果を得るには体積固有抵抗で $10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 程度を達成する必要がある⁽²⁶⁾⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾。以下に、現在市販されている導電性フィラーの概要について述べる。現段階では、シールド効果、体積固有抵抗の測定法は確立していない。従って、各社から出されている測定結果だけから、導電性フィラーの優劣の決断を下すのは難しい。

(1) びびり振動切削法繊維

東大生産技術研究所、中川教授によって開発された新しい金属繊維である⁽³⁰⁾。図 5 にびびり振動切削法による金属繊維の生産方式を示す。材質としては、銅、銅、アルミニウム、黄銅がある。繊維径は 40~120 μm 長さ 2~15 mm の短繊維である。在来の金属繊維製造法である延伸法に比べてきわめて安価に金属繊維が得られる。短繊維であるため、樹脂と混練する場合コンパウンド法によらなければならない。成形品中の繊維は甚だしい破損を受けている。従って、十分なシールド効果を得るには、10体積%程度の金属繊維を添加する必要がある。成形時の樹脂粘度が上昇し成形が困難となる。また成形体の比重が大きくなり、軽量化と言う樹脂の特徴が損なわれる⁽⁵⁾。

図5 びびり振動切削法による金属繊維の製造法。

(2) 炭素繊維

炭素繊維自体、 $1.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ と体積固有抵抗が低く、熱可塑性樹脂に添加すると導電性が発現する。しかし、金属繊維と比較した場合の導電性はかなり低く、炭素繊維は帯電防止などでは少量の添加でよいが、電磁波シールドの目的では約20体積%以上の添加量が必要である。その結果、成形時の流動性が低下し、成形体のアイゾット衝撃値も低下する⁽⁷⁾⁽²⁸⁾。

(3) 金属化炭素繊維

金属化炭素繊維は、導電性向上の目的から、炭素繊維表面に電解メッキを施したものである。体積固有抵抗は $10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ と金属並、比重はアルミニウム程度である。

メッキに用いる金属としては、銅、ニッケルであるが、耐食性の面から銅単独で用いられることは少ない。炭素繊維そのものが脆性材料であるため、金属化炭素繊維も破損し易く、成形時にメッキ層が剥離することもある。従って、十分なシールド効果を得るには、10体積%程度樹脂に混練する必要がある。成形時の流動性が低下する。金属化炭素繊維は、現段階では、かなり高価な材料である⁽⁷⁾⁽²⁶⁾⁽²⁸⁾。

(4) 金属化ガラス繊維⁽²⁹⁾⁽³¹⁾

ガラス繊維の表面にニッケル合金を無電解メッキしたものであり、体積固有抵抗は $10^{-5} \sim 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ と高い導電性を示し、耐食性の高い金属で保護被膜が形成されている。比重は3.2~4.1である。ガラス繊維そのものが脆性材料であるため、成形材料として3ないし6 mm 長のチョップドストランドを用いても、射出成形により0.3~0.6 mm になる。成形体の体積固有抵抗を $10^{-2} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ とするには、熱可塑性樹脂に10~15体積%の金属化ガラス繊維を混練成形する必要がある。成形品比重もかなり大きくなる。

(5) 銅 繊 維

銅繊維は金属繊維の中でも最も電気抵抗が小さく、価格も比較的安価な繊維のひとつである。連続繊維であるため繊維長を長く保つのに有利なマスターペレット方式が用いられる。しかし、繊維そのものの強度が低く、成形時に、繊維切断が生じる。従って十分なシールド効果を得るにはやはり15質量%程度の金属繊維を添加する必要がある。成形性が悪くなるのみならず、成形品の比重も大きくなる。最近では、銅繊維と低融点合金を含有したマスターペレットが上市されている。成形と同時に、低融点合金が銅繊維同士を接触させ、接触抵抗の低減、冷熱サイクル時のシールド効果の低下防止に役立っている⁽²⁷⁾。銅はポリプロピレン樹脂等一部の樹脂を分解するため、用いる樹脂が限定される。

(6) ステンレス鋼繊維

ステンレス鋼繊維の製造工程を図6に示す。ステンレス鋼棒線を、銅あるいは軟銅で被覆、集束し、ダイスで所定の繊維径まで引き抜く。引き抜き後、鞘となる金属を酸洗により除去し、ステンレス鋼繊維束が得られる。この製法により直径2~50 μm の連続繊維が得られる。

連続繊維であるため、繊維破損が最小限となるマスターペレット方式が適用できる。ステンレス鋼繊維の最大の特徴は、少ない添加量で十分なシールド効果が発揮できることである。僅か1体積%程度で十分なシールド効果が得られる(図7)。これは、成形体中の繊維が700以上という高い平均アスペクト比を保っていることによ

図6 ステンレス繊維の製造法⁽³²⁾.

図7 添加量とシールド効果.

図8 成形品中のステンレス繊維(X線透過写真)

図9 (株)アドバンテスト法.

るものである⁽¹⁷⁾。ステンレス鋼としては通常 SUS304 あるいは 316L を使用するため、腐食の心配が無い。金属繊維を用いた電磁波シールド材の場合、冷熱サイクルによりそのシールド効果が低下する問題が心配されている。これは、マトリクスとなる樹脂と金属繊維との熱膨張係数が大きく異なるためである⁽¹⁹⁾⁽³³⁾。ステンレス鋼繊維に関しては、図8に示すように、ステンレス鋼繊維同士が複雑に絡まりあっているために、シールド効果の低下は比較的小さい。また冷熱サイクルによるシールド効果の低下は、マトリクス樹脂の耐熱性と大きく関わりがある。ガラス繊維等の無機フィラーの添加、耐熱性樹脂とのポリマーブレンドによりマトリクス樹脂の耐熱性を向上させることで、シールド効果の低下を極力抑えることが可能である⁽¹⁷⁾。

5. 測定法⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾

最終製品の評価は、電気回路を組み込んだ状態で、オープンサイトあるいは電波暗室で行う必要がある⁽³⁶⁾。しかしながら、シールド材開発のうえで上記の試験を行うことは困難であるため、いくつかの簡易測定法が考案されている。最も簡単な測定法としては体積固有抵抗の測定がある。シールド効果の測定法としては、トランスミッションライン法⁽³⁴⁾、デュアルチャンパー法⁽³⁷⁾(株)アドバンテスト法等がある。図9に(株)アドバンテスト法を示す。この方法は、わが国でもっとも一般的な簡易測定法ではあるが、500 MHz 以上の周波数領域では共鳴を起こすためにデータの信頼性に欠ける。ステンレス鋼繊維複合体に限ってみれば、10 GHz の電波の反射強度を測定する BEKISCAN 法がある⁽³⁸⁾。

6. おわりに

これまで電磁波シールドの市場では、導電性塗料、無電界メッキが優位な立場にあった。昭和63年12月から、VCCI の規制も本格的に始まり、ユーザー各社の電磁波シールドに対する取り組みが、本格化している。成形材料は、従来の製造ラインをそのまま利用できると言う点で、コスト的に極めて有利であり、今後大きく伸びてい

くものと期待されている。その実現には、材料メーカー、成形メーカー、製品メーカーの三者が一致協力することが必要である。

文 献

- (1) 情報処理等電波障害自主協議会：情報処理装置及び電子事務用機器等から発生する妨害波の自主規制措置運用規定。
- (2) 坂本幸夫，山本秀俊：電子技術，30(8)(1988)，28。
- (3) 佐藤由郎：電子技術，30(8)(1988)，19。
- (4) 神戸徳蔵，熊谷八百三，ト部 啓：防錆管理，31(1987)，316。
- (5) 日経ニューマテリアルズ，1987年9月26日号，74。
- (6) S. A. Schelkunoff: 電磁波論，岩波，(1964)。
- (7) D. M. Bigg: Adv. Polym. Technol., 4(3/4)(1984)，255。
- (8) 佐藤弘三：充てん高分子の物性，理工出版，(1978)。
- (9) M. T. Kortshot and R. T. Woodhams: Polym. Compos., 9(1988)，60。
- (10) F. Carmona, F. Barreau, P. Delhae and P. Canet: J. Physique Lett., 41(1980)，531。
- (11) J. Boissonade, F. Barreau and F. Carmona: J. Phys. A: Math, Gen., 16(1983)，2777。
- (12) 前田 修，山木準一，片山祐三：高分子論文集，32(1975)，42。
- (13) 大野 亮：日本ゴム協会誌，57(1984)，178。
- (14) Y. Shimizu, M. Sumita, N. Miyadera and K. Miyasaka: Sen-i Gakkaishi, 42(1986)，T-261。
- (15) K. Miyasaka, K. Watanabe, E. Jojima, H. Aida, M. Sumita and K. Ishikawa: J. Mater. Sci., 17(1982)，1610。
- (16) 住田雅雄：日本接着協会誌，23(1987)，103。
- (17) 高濱裕宣，玉木裕士，戸来稔雄：製鉄研究，330(1988)，24。
- (18) J. J. Reilly, S. J. Thoman and W. W. Lin: SAMPE J. Jan./Feb. (1987)，22。
- (19) S. K. Bhattacharya and A. C. D. Chaklader: Polym.-Plast. Technol. Eng., 19(1)(1982)，21。
- (20) 林 盛彦：名試研 研究報告，70(1985)，1。
- (21) 林 盛彦：機能性材料，5(11)(1985)，26。
- (22) 山田久志，成田道郎：プラスチックスエージ，1988年4月号，164。
- (23) D. M. Bigg: Polym. Compos., 6(1985)，20。
- (24) D. A. Janeczek: ANTEC '86, (1986)，226。
- (25) 岩瀬英裕：東芝レビュー，41(2)(1986)，122。
- (26) 久保誠六，酒井 伸，伊藤 健，西村哲夫：長野県工試研究報告，No. 7(1987)，9。
- (27) 小池 測：プラスチック成形技術，5(2)(1988)，21。
- (28) 中間克美，大北 雅：強化プラスチック，32(1986)，469。
- (29) 大塚晴彦，新井重治，伊勢田 徹：旭硝子研究報告，37(1)(1987)，157。
- (30) 林 寿雄：プラスチック，35(7)(1984)，25。
- (31) 大塚晴彦，新井重治，二宮佑八，川島貞男：強化プラスチック，32(1986)，269。
- (32) 白鳥信令：繊維学会誌，44(1988)，237。
- (33) 梅崎義臣，大崎徹郎，田代計助，石崎正見，山上良彦：福岡県福岡工業試験所研究報告，(1986)，142。
- (34) 「ノイズ対策最新技術」編集委員会：ノイズ対策最新技術，総合技術出版，(1986)。
- (35) 右馬野雅弘：工業材料，36(4)(1988)，61。
- (36) 増田知彦：工業材料，36(4)(1988)，71。
- (37) D. M. Bigg, W. Mirick and D. E. Stutz: Polymer Testing, 5(1985)，169。
- (38) J. Samyn, P. Deceuninck: ANTEC '86, (1986)，282。

掲 示 板

International Congress on Intergranular and Interface Boundaries in Materials

時：1989年9月4日(月)～8日(金)

所：Ecole des Mines de Paris, France

アブストラクト締切：1989年2月

登録締切：1989年5月

問合先：〒106 東京都港区六本木7-22-1

東京大学生産技術研究所 石田洋一

TEL：03-402-6231 内線 2440

FAX：03-402-6350