

技術資料



Technical Data

軟磁性金属粉末を充填したGHz帯向け電磁波吸収体の開発

長瀬亮祐^{*1}, 齋藤章彦^{*2}, 中間 優^{*1}

Development of GHz-band Electromagnetic Wave Absorbers Filled with Soft Magnetic Metal Powder

Ryosuke NAGASE, Akihiko SAITO and Yu NAKAMA

Synopsis

As high-frequency electronic devices become increasingly compact and integrated, managing electromagnetic interference (EMI) has become a critical problem. This study investigates the use of soft magnetic metal powder DAP410L in developing electromagnetic wave absorbers. Compared to other fillers such as DAP316L, iron, and DAP410L, the composition with DAP410L demonstrates superior GHz-band absorption due to its high magnetic loss.

Theoretical calculation results show that composite sheets containing DAP410L achieve significant attenuation, with transmission attenuation reaching -44 dB. Additionally, the material has been successfully applied to injection-molded thermoplastic pellets, enabling EMI suppression in automotive radar housings.

1. 緒 言

近年、ICT（Information and Communication Technology：情報通信技術）の発展に伴い、大容量のデータを高速で通信し処理する要求が高まっている。例を挙げれば通信分野では5G（5th Generation mobile communication system：第5世代移動通信システム）の普及により高速大容量かつ低遅延の通信が可能となり、自動車分野ではCASE（Connected / Autonomous / Shared / Electric：接続性、自動運転、共有、電動化）に伴い、車同士の通信や各種レーダーあるいは画像処理による障害物検知などが実用化されている。ICTは現代において不可欠な技術であり、さらなる技術開発と高い信頼性が求められる。大容量かつ低遅延の通信を実現するためには信号の高周

波化が不可欠であり、Table 1に示すように1 GHzから100 GHzの高い周波数の信号や電磁波が利用される。

電子デバイスの高周波化・小型化要求からより小さく高密度なモジュールが求められる。しかし、不要な外来の電磁波ノイズを遮蔽するために設置した金属筐体と、周波数増幅機能を持つMMIC（Monolithic Microwave Integrated Circuit）やCMOS（Complementary Metal-Oxide-Semiconductor）等の素子との距離が短くなり、筐体内での放射ノイズや素子の入出力間で不要な電磁波ノイズが結合する問題が生じる。例えば、Fig. 1に示すようなミリ波モジュールの場合、金属筐体により外来の電磁波ノイズは遮蔽するが、内部の基板上のMSL（MicroStrip Line）から生じた電磁波ノイズが金属筐体での多重反射で生じる共振や入力側MSL1と出力側MSL2

2025年10月1日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博 (Dr. Eng., Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

間の不要な電磁波ノイズの結合に伴う利得の減少や不安定化により装置の誤作動や誤検知が起こる。そこで、モジュール内では不要な電磁波ノイズ対策として、電磁波吸収シート（Noise Suppression Sheet：NSS）が用いられている。同様の問題は高周波を用いた5G通信等にも発生するため、ICTの発展に伴いより高度な電磁波ノイズ対策が必要となる¹⁾。

以上を背景として、本稿では以下の構成で電磁波吸収体の概要と開発事例を紹介する。第1章では昨今のICTの発展によって電磁波ノイズによる問題が顕在化し、ノイズ対策が必要であることを述べた。第2章では電磁波吸収体の設計理論について説明する。第3章では設計理論から実際に電磁波吸収体としての設計事例と筐体への実装を想定した最適化事例について述べる。第4章では電磁波吸収体の開発事例として射出成形用樹脂に軟磁性粉末を充填し、射出成形部品に電磁波吸収性能を付与した開発事例について述べる。

Table 1. Applications and wavelengths for each frequency.

Freq. (GHz)	Applications	Wavelengths λ (mm)
1	Personal computer	300
5	Mobile phone	60
10	Mobile phone	30
20	Base station amplifier	15
24	Millimeter-wave radar for automobiles	12
28	Local 5G network	10.7
40	Base station amplifier	7
60	Wireless gigabit	5
77	Millimeter-wave radar for automobiles	4
100	Base station amplifier	3

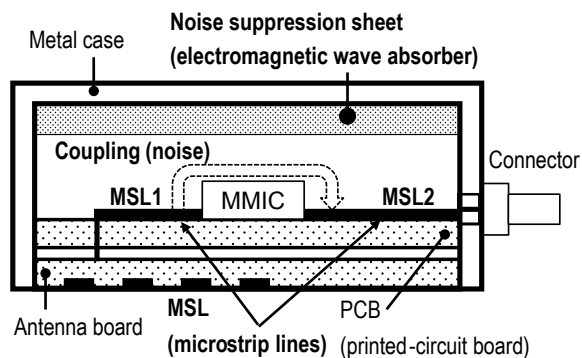


Fig. 1. Automotive millimeter wave radar housing and noise suppression sheet.

2. 設計理論

2. 1 筐体内の電磁波減衰理論

一般的な電磁波ノイズ対策として以下の3つがある。Fig. 2(a)のように金属板によるシールドは波源からの距離にかかわらず一般的に使用される。また、Fig. 2(b)のように電磁波吸収体による吸収は電磁波吸収体の裏面に金属板を配置し、電磁波の波長 λ に対して波源が $\lambda/2\pi$ 以上離れた遠方界の場合に使用される。一方でFig. 1のように車載ECU（Engine Control Unit）やミリ波レーダーなどのモジュール内部に対しては金属筐体内の共振を抑制させるため電磁波吸収体を配置する方法が試行錯誤で施工されているが理論的な説明がない。したがって、電磁波吸収体の設計には実際にECUなどを模擬した筐体を作製、モデル化する必要がある。齋藤らは例えばFig. 2(c)のように金属筐体内の電磁波吸収体上部を通過する電磁波の吸収量は、①3層導波管モデルと②MSLからの電波の入出力の式および③金属筐体の多重反射を考慮したものと考え、その理論式を確立した²⁾。電磁波吸収体の上部を電磁波が通過した時の入出力の強度比[dB]と電磁波吸収体の長さから単位長さ当たりの吸収量を伝送減衰 α [dB/mm]として定義した。以後、これを筐体内部の電磁波吸収性能の評価指標として用いる。

2. 2 電磁波吸収エネルギー

一般的に電磁波は媒質を伝搬する際に減衰することが知られており、その減衰量は誘電率や透磁率など物性値に支配される。媒質における複素比誘電率や複素比透磁率を以下の式に示す。

$$\text{複素比誘電率 } \epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$$

$$\text{複素比透磁率 } \mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$$

複素比誘電率および複素比透磁率の虚部となる ϵ_r'' 、 μ_r'' は導電率 σ [S/m]と共に電磁波のエネルギー減衰量に比例し、減衰したエネルギーは熱に変換される。このとき、電磁波吸収エネルギー P [W/m²]は、真空の誘電率 ϵ_0 [F/m]、真空の透磁率 μ_0 [H/m]、電界 E [V/m]、磁界 H [A/m]、および角周波数 ω [Hz]を用いて以下3つの式で表すことができる。

$$\text{a) 誘電損失 } P = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2$$

$$\text{b) 磁性損失 } P = \frac{1}{2} \omega \mu_0 \mu_r'' |H|^2$$

$$\text{c) 導電損失 } P = \frac{1}{2} \sigma |E|^2$$

そして、電磁波吸収体の電磁波吸収エネルギー P は上記損失の和として考えると次式で表すことができる。

$$P = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' |E|^2 + \frac{1}{2} \omega \mu_0 \mu_r'' |H|^2 + \frac{1}{2} \sigma |E|^2$$

今回対象とする GHz 帯において導電損失は誘電損失と磁性損失に対して小さいため、 ε_r'' と μ_r'' を高めることが電磁波吸収体の開発において重要である³⁾。次章では電磁波吸収エネルギー P が高くなる電磁波吸収体を試作し、伝送減衰 α におよぼす影響を確認した。

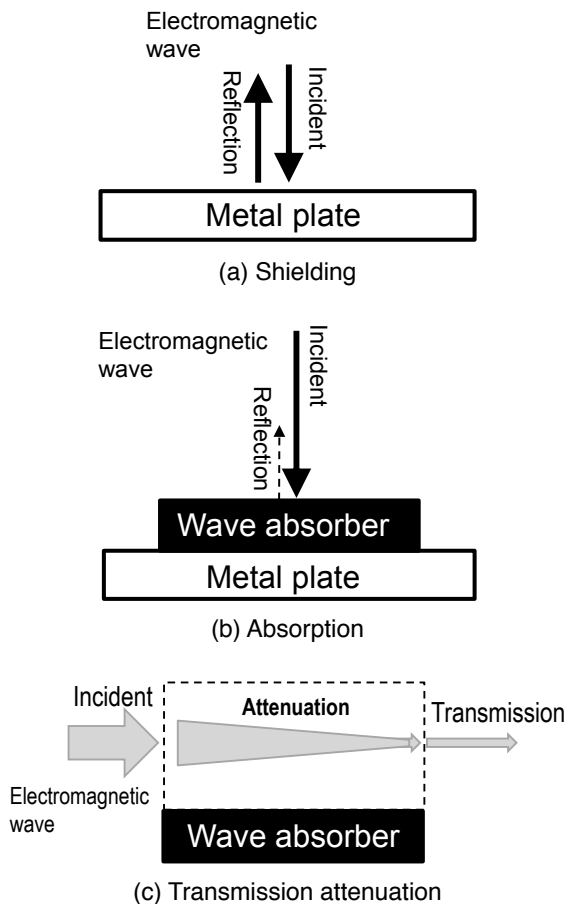


Fig. 2. Methods for suppressing electromagnetic waves.

3. 材料設計および最適化

3. 1 電磁波吸収エネルギーに基づく材料設計

まずミリ波および準ミリ波帯域において高い電磁波吸収エネルギー P を有する電磁波吸収体について検討する。

金属粉末をフィラーとしてエポキシ樹脂に充填した複合材シートを想定し、電磁ステンレス粉末（商品名：DAP410L）、非磁性ステンレス粉末（商品名：DAP316L）、純鉄粉（他社製品）を Table 2 に示した粒径と充填率で複合材シートを試作した。次に複合材シートの電磁波吸収エネルギーを複素比透磁率と複素比誘電率から求めた。複合材シートを方形導波管に充填した状態でネットワークアナライザー E8510C と接続し、得られた S パラメーターから Nicolson-Ross-Weir 法にて複素比誘電率と複素比透磁率を算出した。伝送減衰 α も同様に評価した。Fig. 3 にミリ波レーダーに使用される 24 GHz における伝送減衰 α を縦軸、電磁波吸収エネルギー P を横軸にプロットした結果を示す。DAP410L は DAP316L や純鉄粉よりも複合材シートの伝送減衰 α が負に大きく、電磁波吸収エネルギー P も純鉄粉と同程度に大きい。したがって伝送減衰 α と電磁波吸収エネルギー P には相関があり、DAP410L は電磁波吸収体のフィラーとして DAP316L より優れ、純鉄粉相当の電磁波吸収性能があると考えられる⁴⁾。

Table 2. Comparison of powder fillers.

Filler	DAP410L	Fe powder	DAP316L
Chemical composition [mass%]	Fe Cr 13 Si 1	Pure Fe	Fe Ni 13 Cr 17 Mo 2.5
Filler content [vol.%]	28.8	24.4	24.5
Particle size [μm]	6.6	7.1	9.9
Corrosion resistance	Good	Poor	Good
P [kW/m^3]	55	55	15
α [dB/100mm]	-28	-25	-8

* P : Electromagnetic wave absorption energy

* α : Transmission attenuation

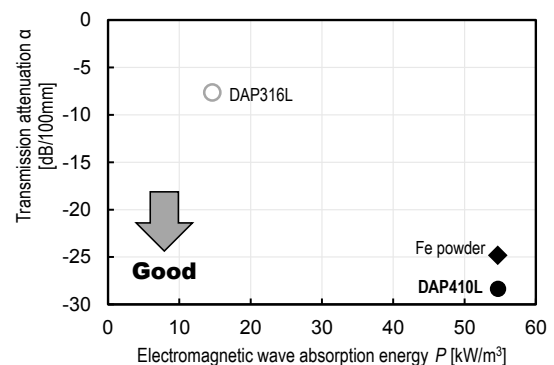


Fig. 3. Transmission attenuation vs. absorption energy at 24 GHz.

同じステンレス粉末でも磁性を持つ DAP410L で伝送減衰 α が大きい結果となったが、これは磁性損失の寄与が大きいことが要因として考えられる。Fig. 4 に複素比透磁率と複素比誘電率から算出した各複合材シートの磁性損失と誘電損失を示す。磁性損失は複素比透磁率の虚部 μ_r'' に依存するため、同じ充填量であればフィラーの比透磁率が大きいほど複合材シートにおける複素比透磁率の虚部 μ_r'' を増加させやすく、電磁波吸収エネルギー P の増加に有利である。DAP410L は耐食性と伝送減衰に優れ、電磁波吸収体のフィラーとして適していると考えられる⁴⁾。

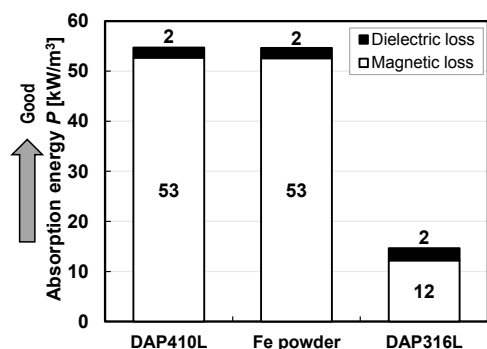


Fig. 4. Magnetic loss and dielectric loss of composite sheet.

3. 2 理論計算による最適化

Fig. 1 で示したミリ波モジュールにおいて、実際に MMIC のような増幅器の入力側の MSL1 と出力側の MSL2 で不要な電磁波ノイズの結合が起こり、利得の減少や不安定化が起こる。軟磁性粉末を使用した電磁波吸収体は GHz 帯域において高い吸収性能を持つためノイズ対策として使用されているが、理論式がないため試行錯誤が必要であった。そこで、齋藤らは筐体内における電磁波吸収体の吸収性能について理論式を導出した。理論式は 3 層導波管モデルと MSL からの電波の入出力の式および金属筐体の多重反射を考慮したものである²⁾。

この理論式から最適なフィラー充填量および厚さについて最適化した。本計算では 9 GHz から 11 GHz までの増幅器を想定し、筐体寸法は奥行き 22.9 mm、高さ 10.2 mm、長さ 62 mm とした。Fig. 1 における電磁波ノイズの結合を模擬するため、Fig. 5 のように MMIC を省略して MSL1 と MSL2 のみとした筐体を考え、MSL1 と MSL2 の電磁波結合を理論計算により求める。Port 1, Port 4 を 50 Ω に終端したとし、Port 3 の入力に対して Port 2 での電磁波結合による出力を計算し、Port 2 と Port 3 の出力比を S_{23} とした。 S_{23} は電磁波ノイズの結合量を示す。今回は 9 GHz から 11 GHz までの増幅器を想定したので、この周波数範囲の S_{23} の最大値をノイズ

最大値として S_{23max} と表す⁵⁾。電磁波吸収体についてはフィラーを充填したゴムシートとして検討した。フィラーは軟磁性金属材料として Fe-7Al-9Cr、誘電損失材料としてカーボンフィラーを検討した。理論式から各フィラーの充填量およびシート厚さにおける S_{23max} を算出し、縦軸をシート厚さ、横軸を各フィラーの充填量として S_{23max} の大きさに応じてカラーマッピングした結果を Fig. 6 に示す。カーボンフィラーは厚みと充填量の上限で S_{23max} は最小値 -26 dB を示すが、軟磁性金属フィラーではシート厚さ 1.5 mm、充填量 28 vol% にて S_{23max} は最小値 -44 dB を示し、カーボンフィラーよりも大きな減衰となった⁵⁾。

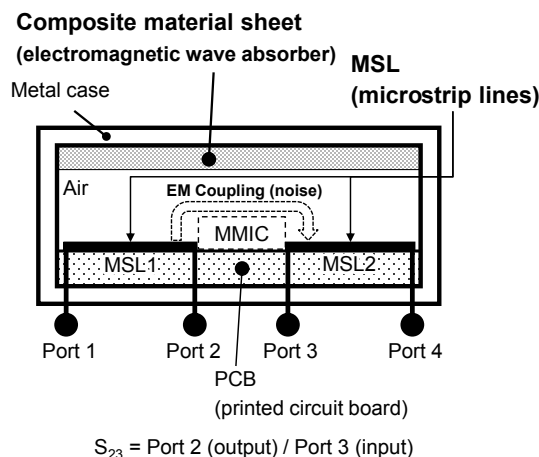


Fig. 5. Model for the theoretical calculation.

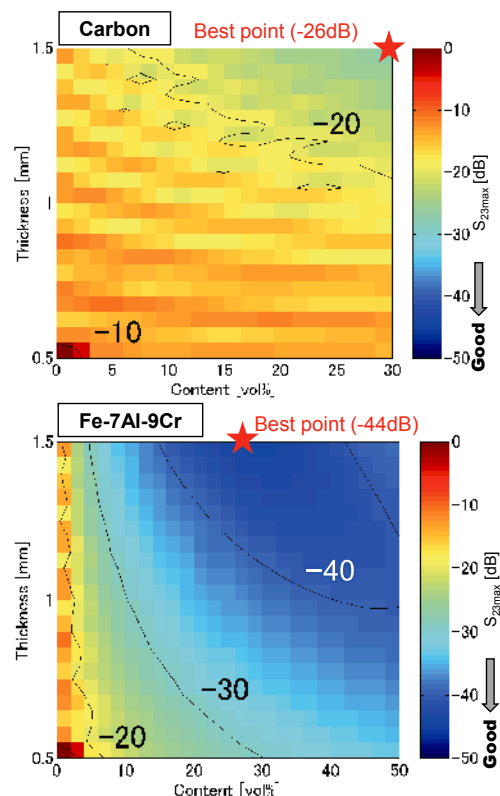


Fig. 6. S_{23max} map by sample thickness and filler content.

3. 3 最適条件の実機検証

最適条件における電磁波吸収体のノイズ抑制効果を実機で検証するため、Fig. 5 で示したモデルを元に回路および筐体を試作した。筐体の Port 1 と Port 4 を 50 Ω で終端し、Port 2 と Port 3 をネットワークアナライザー HP8510C に接続して S パラメーター S_{23} を計測した。 S_{23} を測定した後、前項で導出した最適条件：シート厚さ 1.5 mm、充填量 28 vol.% で軟磁性金属フィラーを充填したゴムシートを試作し、筐体に貼付して再度 S_{23} を測定した。シート貼付前と貼付後の S_{23} の実測値と計算値を Fig. 7 に示す⁵⁾。シート貼付前の筐体では S_{23} の計算値は実測値と比較して共振ピークの位置および周波数特性の形は一致し、多重反射によるピークが見られる。シート貼付後の筐体では多重反射によるピークは消滅しており、実測 $S_{23\text{max}}$ は約 -40 dB と高い電磁波吸収効果を確認できた。軟磁性金属粉の高い電磁波吸収効果は筐体内において有効と考えられる。

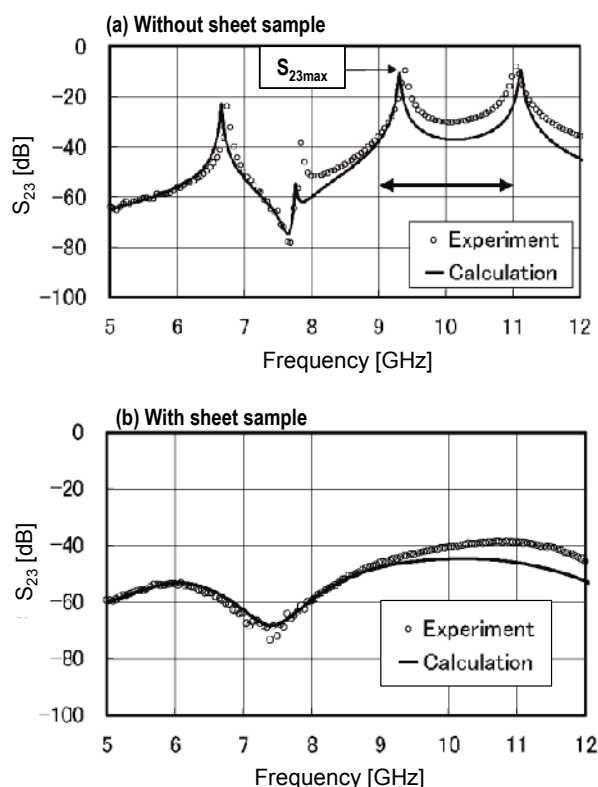


Fig. 7. Calculated and measured S_{23} . (a) Without sheet sample; (b) with sheet sample (1.5 mm thick, 28 vol% filler).

4. 電磁波吸収体の開発事例

4. 1 自動車用ミリ波レーダー向け電磁波吸収体

Fig. 1 に示したように自動車用ミリ波レーダー (79 GHz) 筐体にはノイズ対策として電磁波吸収ゴムシートが貼付されているが、仮に筐体単体で電磁波を吸収できれば、貼付による追加コストや工数を削減できる。追加コストには材料費やシート貼付など生産工程、事前検討の工数などが挙げられる。また、内部基板によるノイズ対策を省略し、基板やレーダー本体を小型化できる。電磁波吸収性能を持つ筐体はミリ波レーダーを含め、幅広い電子機器への応用が期待できる。

樹脂はエンジンに近い環境下で使用されるため、耐熱温度 120 $^{\circ}\text{C}$ が求められる。Fig. 8 に PBT (ポリブチレンテレフタレート)、PPS (ポリフェニレンスルフィド)、PVC (ポリ塩化ビニル)、ABS (アクリロニトリルブタジエンスチレン)、PEEK (ポリエーテルエーテルケトン) の相対価格と耐熱温度を示す。

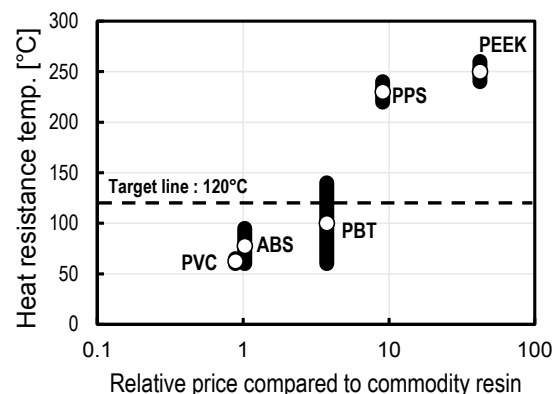


Fig. 8. Heat resistance vs. relative price of various resins.

耐熱温度と樹脂価格には相関があり、要求特性と価格のバランスから PBT を候補として選定した。検討結果から射出成形樹脂メーカーである東洋紡エムシー殿との共同開発により、PBT 樹脂製品に軟磁性粉末 DAP410L を充填した Fig. 9 に示すペレットを開発し、板状の射出成形サンプルを作製できた^{6) 7)}。

東洋紡エムシー殿より提供いただいた射出成形サンプルについて 60-90 GHz 帯域における伝送減衰 α をネットワークアナライザー N5227A で評価した。市販の純鉄粉含有電磁波吸収ゴムシートとの比較結果を Fig. 10 に示す^{6) 7)}。開発品は比較品に対して良好な減衰特性を示

しており、筐体部品に採用することで既存の電磁波吸収ゴムシートよりも高い電磁波吸収効果が期待できる。

また、Fig. 11のようなCF（カーボンファイバー）充填樹脂と電磁波吸収体を二色成形した筐体やAI等の金属筐体と電磁波吸収体を一体射出成形した筐体にすることでコスト低減が可能である。

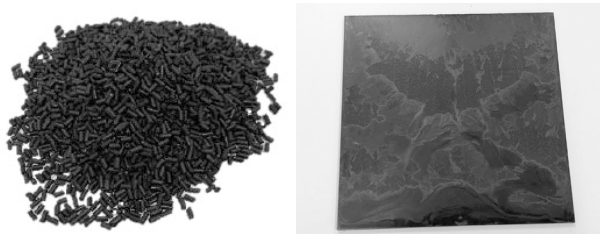


Fig. 9. Injection molding pellets for electromagnetic wave absorbers and injection molding sample.

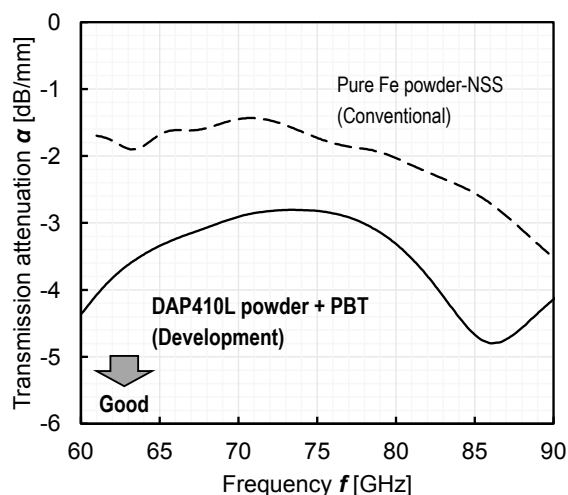


Fig. 10. Transmission attenuation at 60-90 GHz band.

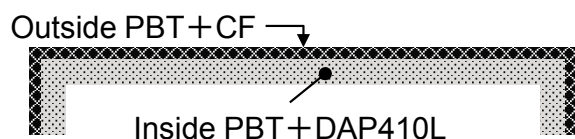


Fig. 11. Two-color injection molding sample.

5. 結 言

電磁波の吸収理論に基づき軟磁性粉末を充填した電磁波吸収体の最適設計ならびに開発事例について紹介した。

これまでの最適化事例を踏まえ東洋紡エムシー株式会社との共同開発により電磁波吸収性能を付与した射出成形用ペレットを開発した。開発材により車載ECUやレーダーなどの電子部材筐体そのものに従来材より高いノイズ抑制効果を付与することが可能になった。

謝辞

今回紹介した電磁波吸収体ペレットの共同開発にご協力いただいた東洋紡エムシー株式会社の関係各位に深く感謝いたします。

(文 献)

- 1) 齋藤章彦：電磁波吸収・シールド材料の開発と電磁ノイズの対策，技術情報協会，2024，538.
 - 2) 齋藤章彦，西方敦博：電子情報通信学会論文誌，J84-B(2001)，10，1834.
 - 3) 橋本 修：電波吸収体入門，森北出版，1997，8.
 - 4) 中間 優，齋藤章彦：「自動車衝突防止レーダー用電磁波吸収シート」，電子情報通信学会総合大会，B-4-4(2017).
 - 5) 齋藤章彦，西方敦博：電子情報通信学会論文誌，J85-B(2002)，3，400.
 - 6) 大同特殊鋼(株)と東洋紡(株)が共同開発 高度センシング・高速通信機器向け電磁波吸収体用射出成形ペレットを初出展 ～部品点数の削減により成形品の軽量化，組立作業の簡素化に貢献～：東洋紡株式会社プレスリリース，(2022).
- ※ 2023年 4月に東洋紡(株)から電磁波吸収体に係る事業部門が分社化され，東洋紡エムシー(株)に移管されました。
- 7) 堀雄策，玉津島誠：「電磁波吸収体に向けた射出成形材料」，プラスチック成形加工学会秋季大会，I-104，33(2024).



長瀬亮祐



齋藤章彦



中間 優