

銅箔と樹脂による多層構造磁気シールドの低周波領域解析に関する研究

著者	大野 雅史
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編
巻	61
ページ	1-5
発行年	2020-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00022879

銅箔と樹脂による多層構造磁気シールドの低周波領域解析に関する研究

ANALYSIS OF MULTI-LAYERED SHIELDING DEVICE USING CU FILM AND REZIN FILM IN LOW-FREQUENCY REGION

大野雅史

Masashi OHNO

指導教員 品川満

法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士課程

This paper describes the shielding effectiveness (SE) of a multi-layered shielding device in low frequency region. Cu film and PET film is used for the multi-layered shielding device. The SE of the multi-layered shielding device is estimated by an electromagnetic field simulator. We were able to analyze SE in frequency range from 100 kHz to 1 GHz by using the pulse waveform. We found that the SE of Cu/Cu/Cu is nearly equal to that of Cu/PET/Cu. And we found that SE of Cu/PET/Cu/PET/Cu is 41 dB at 500 kHz.

Key Words : Shielding effectiveness, Shielding device, Cu film, PET film, multilayered device, electromagnetic field simulation, low frequency noise

1. 序論

近年、地球の平均気温が上昇する温暖化現象が問題となっている。この温暖化を引き起こす原因として、人間の活動によって発生する二酸化炭素(CO₂)が原因と考えられている[1]。また、主に自動車によるCO₂の排出が問題となっている。これらの対策として電気自動車(EV: Electric Vehicle)に注目が集まっている[2]。EVは、密度あたりのエネルギー量が大きいリチウムイオン電池の発展により、目覚ましい発展を遂げ、再生可能エネルギーである点などから人気を集めている。しかし、EVのさらなる普及に向けた問題がある。EVの電気によって発生する電磁ノイズである。図1にEVの構造を示す。

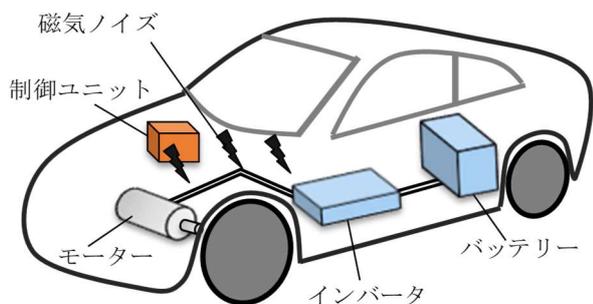


図1 EVの構造

EVは主に、バッテリー、インバータ、モーター、制御ユニットで構成されている。また、それらへの電気供給のためにワイヤーハーネスにより配線されている。これらの部品の中でインバータ、ワイヤーハーネスから発生する電磁ノイズが問題となっている[3]。電磁ノイズは低周波数成分を持っており、制御ユニットに放射されることで誤動作や故障の原因などを引き起こす可能性を持っている[4]。これらの電磁波の対策としてシールド材の使用が考えられている。シールド材は電磁波を反射や減衰の効果により電磁波を遮断することが可能である。そのためシールド材で放射源を囲うことによって、シールド材が持つ性能により制御ユニットへの電磁波の放射を防ぐことが可能である。EVや電子デバイスの発展を考え、シールド材の使用量が多いことや電子デバイスの小型化の傾向から、コスト、柔軟性、薄さ、性能が重要になる。しかし、問題点として、ある程度の遮断性能を持つためには、シールド材の厚さが必要となることが挙げられる。そのため、シールド材の構造として、注目が集まっている多層構造のシールド材に着目した。本論文では、シールド材でよく使用され、導電率、延性に優れる銅箔と、加工に優れ比較的安価な樹脂によるシールド材に着目した。多層構造による優位性はまだ明らかになっておらず、特に低周波でのシールド効果の優位性が明らかになっていない問題があるが、解析コストが高いため解析が困難であるという問題があった。そのため本論

文では、銅箔と樹脂による多層構造磁気シールドが単層に比べ優位であるのかを電磁界シミュレーションを用いて明らかにし、コスト、加工性、薄く性能の良いシールド材の設計の指針となることを目的としている。

2. シールド効果

(1) シールド効果について

シールド効果(SE : Shielding Effectiveness)とは放射された電磁ノイズがシールド材を介してどの程度減衰したかを表した値のことである。評価方法としては、入力した信号の電力とシールド材を通過した後に受信された信号の電力の損失を計算することで SE が得られる。便宜上、正の値に変換するため SE が高いほど電磁ノイズを妨げる能力があることを表している。入射波の電力を P_{in} [W]、入力波がシールド材を透過後の透過波の電力を P_{out} [W]と定義すると式(1)のように表される。

$$SE = -10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

シールド材により減衰が起こる仕組みは、シェルクノフの式が一般的によく用いられている。シェルクノフの式の考えを用いた、シールド効果の仕組みを図2に示す。

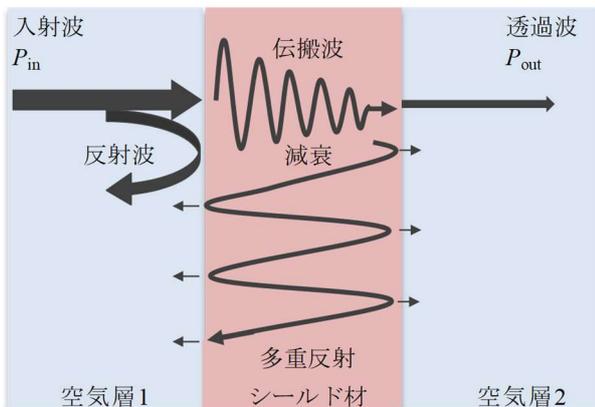


図2 シールド効果の仕組み

図2は入射波 P_{in} が透過波 P_{out} になるまでの過程を示している。入射波は、はじめに空気層1とシールド材表面の層で反射される。次に反射されずにシールド材内部に侵入した伝搬波は、シールド材内部を進行することにより減衰される。また伝搬波はシールド材と空気層2の層で反射が起こる。ここで反射された伝搬波は再び進行することでの減少、空気面とシールド面の層での反射を繰り返す。最終的に透過されたものが透過波となる。ここでの P_{in} 、 P_{out} を式(1)に適用し、計算することで SE は計算される。シェルクノフの式について詳しく説明する。 R [dB]はシールド材表面における反射損失量、 A [dB]はシールド材内での減衰損失量、 M [dB]はシールド材内の多重反射補正量と定義すると、シェルクノフの式[5]は式(2)のように示される。

$$SE = R + A + M \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

式(2)の反射損失量 R [dB]、減衰損失量 A [dB]、 M [dB]多重反射補正量は式(3)、式(4)、式(5)のように示される[5]。

$$R = \frac{(Z_0 + Z_s)^2}{4Z_0 Z_s} \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

$$A = 15.4t \sqrt{f\sigma\mu} \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

$$M = 20 \log_{10}(1 - \lambda^{-2t/\delta}) \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

ここで、 Z_0 [Ω]は空気中の特性インピーダンス、 Z_s [Ω]は試料の特性インピーダンス、 t [m]は試料の厚さ、 f [Hz]は周波数、 λ [m]は波長、 σ [S/m]は導電率、 μ [H/m]は透磁率、 δ [m]は表皮厚さである。上記式より、低周波成分は主に反射損失より減衰が行われていることが分かる。本論文では、この特性を利用し、意図的に多層により反射層を増やすことで、低周波のシールド効果の上昇を図っている。

(2) 低周波解析方法

本論文では100 kHzからの解析を行う。しかし、FDTD法において、周波数が低いほど波長が長くなる関係性によって、観測時間は低周波になるほどに増加する。観測時間が伸びることにより解析に要する解析時間自体も大幅に増えてしまう。このような関係性から低周波の解析が困難である状況であった。そのため、使用したシミュレーションPCのスペックでは、低周波は10 MHzが限界であった。単一周波数を考慮した評価方法では短い解析時間で効率的に測定可能であるが、シールド効果の評価やアンテナの性能評価などの周波数特性を解析したい場合に適していなかった。正弦波を使用した従来解析方法を図3に示す。

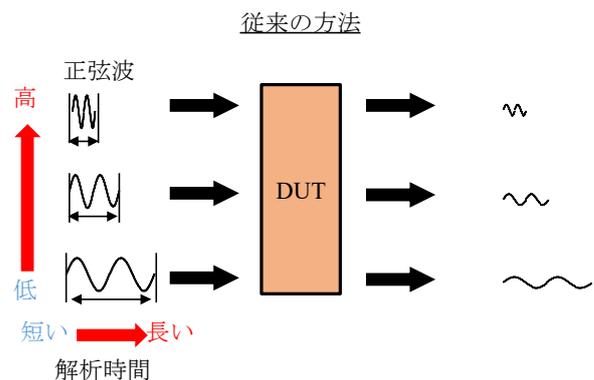


図3 従来解析方法

従来解析方法では、低周波解析が困難であるため、本論文ではパルス波による新規解析方法を用いた。新規解析方法は、測定対象物にパルス波を入力し電圧波形の結果を得る。得られた入出力結果を離散フーリエ変換(DFT: discrete Fourier transformation)を行い周波数波形に変換する。周波

数変換した出力結果と入力結果の比をとることでパルスが持っている周波数成分の範囲であれば測定対象物を通してどの程度減衰したのかを評価することが可能である。図4にパルス波を使用した新規解析手法を示す。

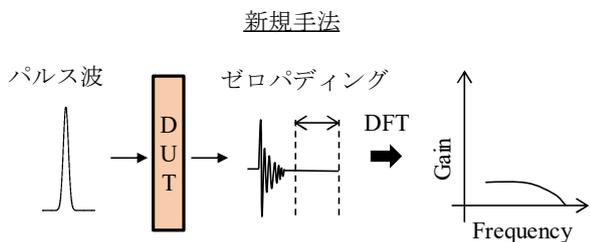


図4 新規解析手法

新規手法で用いたパルス波は、100 kHz から 1 GHz での解析を行うためにパルス幅は 0.2 ns、ゼロパディング時間は 100 μ s まで行っている。ここでゼロパディングは十分には電圧波形が十分に 0 に落ち着いたことを条件に、それ以降も 0 が続くことと仮定し、0 データを付加することにより、波形の時間長を伸ばす方法である。

3. シールド効果の評価

(1) 測定方法

本論文では、代表的な SE 評価方法である同軸管法, KEC 法を検討した。検討した結果、本論文では、KEC 法を選択し、SE 評価に使用した。KEC 法の測定系を図5に示す。



図5 KEC 法の測定系

KEC 法の KEC 治具は送信用と受信用の治具に分かれており、その間に測定試料（シールド材）を入れ、受信側でどれだけ信号が減衰したかを評価する方法である。任意の周波数の電磁波を送信側の治具から放射させ、受信側の治具で信号を受信し、プリアンプを用いて受信した信号を増幅させる。このとき入力信号のパワーと受信されたパワーの比を計算することで損失量を計測する。この KEC 治具を用いた計測により、挟み込んだ試料の評価が可能である。

KEC 治具によるシールド評価の際に、KEC 治具によるシールド材の締め付け強度で不安定性が確認された。シールド材と KEC 治具との密着性の問題が考えられたため、シールド材と KEC 治具との密着度合いを確認した。KEC 治具とシールド材の密着度の確認結果を図6に示す。

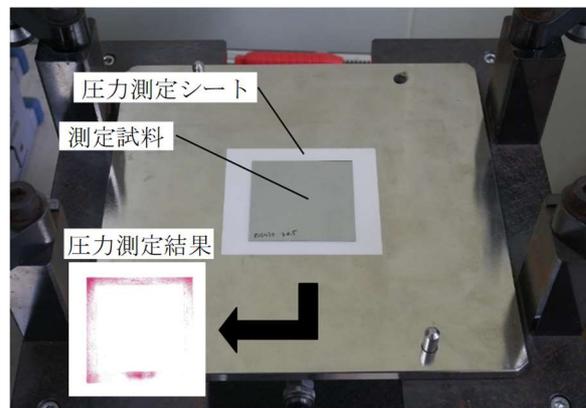


図6 KEC 治具とシールド材の密着度確認結果

図6に示すように、圧力測定シートによる密着度の確認を行った。圧力測定の結果から十分な密着が確認されなかった。そのため、治具とシールド材の間に隙間が発生し、電磁波の漏れによる正確な測定ができていないことが予想されるため、従来の締め付けネジによる固定ではなく、クランプを用いて密着度を上げる方法により評価を行った。その際の実測方法を図7に示す。

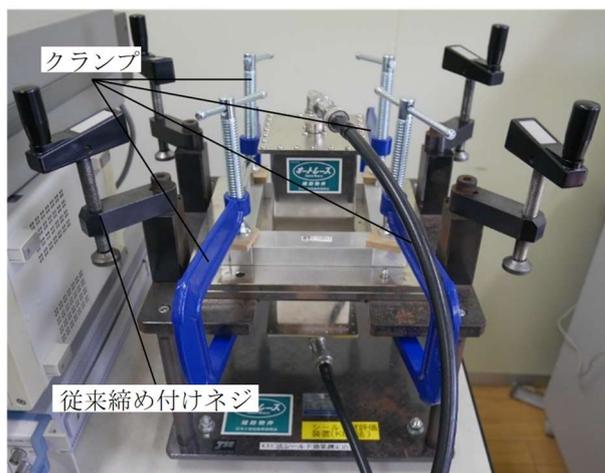


図7 クランプを用いた実測方法

図7に示すように、4つのクランプを用いて対になった KEC 治具を固定することで固定強度の向上を図った。クランプを用いてシールド材の測定をすることで、十分な密着が確認でき、シールド効果の締め付けによる依存が見られなくなった。そのためこの方法を用いて測定を行う。

(2) 解析方法

KEC 法を再現し、解析を行うために KEC 治具のモデリングを行った。KEC 治具は治具が対になっており、片側は送信用、もう一方は受信用の役割を持っている。電磁波の送信、受信にはループアンテナを用いており、それぞれのループアンテナの先端には、電磁波の送受信用にスリットがはいっている。設計した KEC 治具のシミュレーションモデルを図8に示す。解析には、もう一つ同じ治具を対に向かい合わせシールド材を挟み込み解析を行っている。

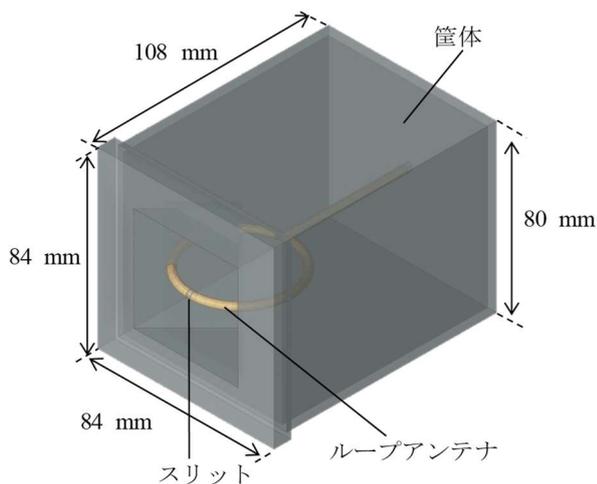


図8 KEC 治具シミュレーションモデル

(3) シールド材

本論文で行う測定、解析では銅箔と樹脂の PET フィルムを用いた。銅箔、PET フィルムは、60 mm×60 mm のサイズを使用し、厚さは任意のものを選択し、測定、解析を行って。また、本論文で解析を行う多層構造は銅箔と PET フィルムを交互に積層したものと定義する。3層構造の多層構造シールド材を図9に示す。

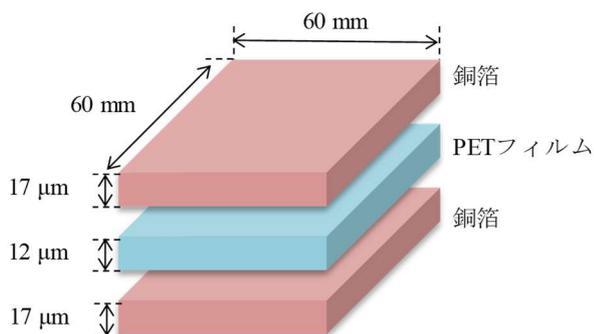


図9 銅箔と PET フィルムによる多層構造シールド材

4. シミュレーション結果

(1) 低周波解析

従来方法の正弦波による解析と新規手法のパルス波による解析結果の比較を行った。比較結果を図10に示す。

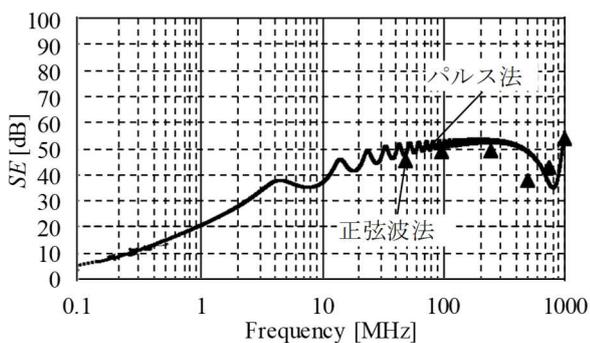


図10 正弦波法とパルス波法の比較結果

図10から確認できるように、傾向の一致が確認された。従来方法では10 MHzが限界だったが今回のパルス波法では低周波が解析可能であることを示している。また、従来方法の観測時間と解析時間をまとめた表を表1に示す。

表1 周波数と解析時間の関係

周波数	観測時間 (2周期)	解析時間
10 MHz	200 ns	1 week
100 MHz	20 ns	20 hours
1 GHz	2 ns	2 hours

表のように10 MHz以下の解析では、非常に解析が困難であることが分かる。しかし、パルス波を用いたことにより、約36時間で解析を行うことが可能になった。

(2) Cu 17 μm の評価結果

厚さ17 μmの銅箔を解析、測定、理論値で評価し、比較を行った。理論値は式(2)を用いて計算を行った。比較結果を図11に示す。

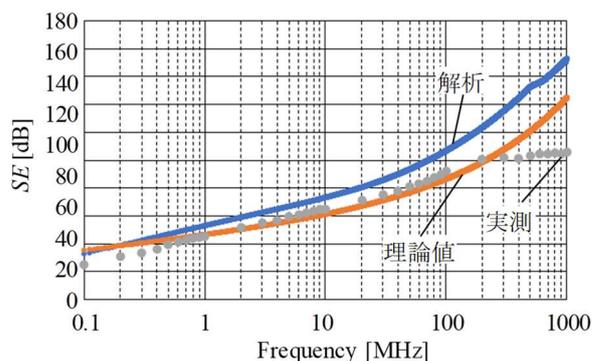


図11 Cu 17 μm の解析、実測、理論値の比較結果

図11から分かるように、解析、実測、理論値で近い傾向を確認できた。そのため解析方法の妥当性を確認できた。

(3) 多層構造磁気シールド解析結果

銅箔とPETフィルムを層構造にした多層構造磁気シールド Cu 17 μm / PET 12 μm / Cu 17 μm のモデルを作成し、解析を行った。今回総厚みが同じである Cu 17 μm / Cu 12 μm / Cu 17 μm も同様にモデルを作成し、比較を行った。図12に比較を行ったシールド材のモデルを示し、図13に多層構造磁気シールドと単層の磁気シールドの比較結果を示す。

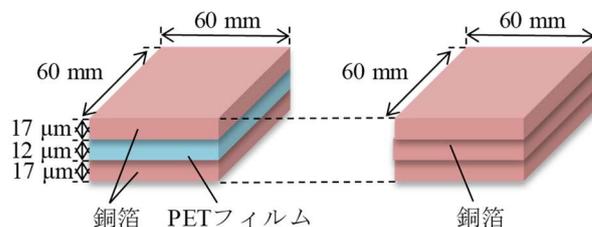


図12 Cu 17 μm の解析、実測、理論値の比較結果

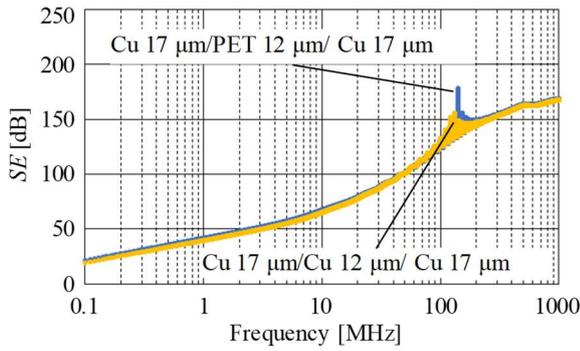


図 13 多層と単層の磁気シールドシールド効果比較結果

単層と多層を比較すると、ほぼ変わらないシールド効果が確認された。多層にすることによってできた層構造により反射面が単体に比べ、2倍に増える。異なる材質によってできた境界面でのインピーダンスミスマッチが生まれることにより、反射による損失が増えたことが予想できる。今回 PET フィルム自体のシールド効果はほぼないことを確認したため、層構造による反射損失と単層の銅箔 12 μm 分の表皮効果による導体損失が同程度あり、今回の結果が出たのではないかと考えられる。

次に 5 層構造の多層構造磁気シールドの解析を行った。厚さ 17 μm の銅箔 3 枚と厚さ 12 μm の PET フィルム 2 枚を交互に積層したシミュレーションモデルを作成した。解析に使用した多層モデルを図 14 に示す。また、多層と単層との比較結果を図 15 に示す。

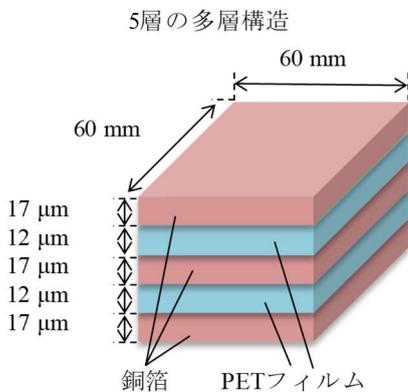


図 14 5 層構造の多層構造磁気シールド

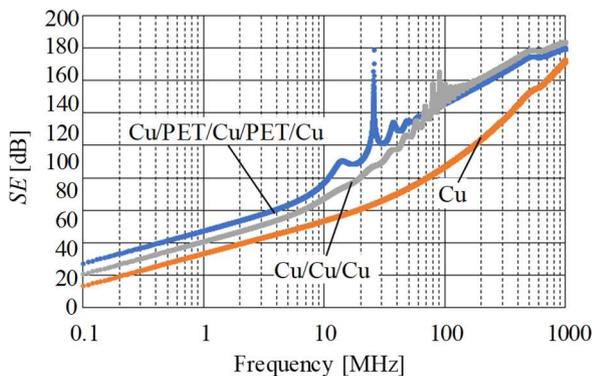


図 15 多層単層解析結果比較

図 15 から確認できるように、銅箔の総使用量が同じ単層構造と比較しても SE が多層の方が優位であることが確認できる。解析した銅箔と樹脂による 5 層構造の多層磁気シールドは 500 kHz で 41 dB を得ることができた。これは磁界強度を 99 % 減衰させることを意味しており、十分にシールド材として使用可能だと考えられる。また、本論文で比較した単層と多層の比較により、銅箔を減らし PET フィルムに置き換えても変わらない SE が得られることから、銅箔のコスト、重量、柔軟性の観点で多層の方が優位であるという結果を得ることができた。

5. 結論

本論文では、従来[6]の FDTD 法による解析では 10 MHz での評価しかできなかったが、100 kHz からの低周波の解析を確立した。確立した解析方法を用いて、銅箔のみと、銅箔と樹脂による多層構造の解析結果を比較し、多層による構造によって単層とほぼ同じシールド効果を得られることを確認し、多層は層構造によって反射損失を増やしシールド効果を上昇させることが分かった。また、最終的に行った 5 層構造の多層構造のシールド材で、500 kHz において 41 dB のシールド効果を得ることができ、十分な減衰特性をもつシールド材の検討が行えた。そのため、銅箔の使用量を減らし、コスト、重量面で単層より優れることが分かり、今後の多層構造によるシールド設計の指針を得ることができた。

参考文献

- 1) Bose, B. K. et al. : Global Warming: Energy, Environmental Pollution, and the Impact of Power Electronics, IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol.4, No.1, pp.6-17, 2010
- 2) Ribberink, H. et al. : Electric vehicles — A 'one-size-fits-all' solution for emission reduction from transportation?, 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013
- 3) Mutoh, N. et al. : A suitable method for ecovehicles to control surge voltage occurring at motor terminals connected to PWM inverters and to control induced EMI noise, IEEE transactions on vehicular technology, Vol.57, No.4, pp.2089–2098, 2008
- 4) Mutoh, N. et al. : EMI noise control methods suitable for electric vehicle drive systems, IEEE Trans Electromagn Compat, Vol.47, No.4, pp.930-937, 2005
- 5) Tai, M. F. et al. : EMI shielding performance by metal plating on mold compound, 2016 IEEE 37th International Electronics Manufacturing Technology (IEMT) & 18th Electronics Materials and Packaging (EMAP) Conference, 2016
- 6) Akiyama, T. Akiyama, et al. : Shielding Effectiveness of multi-layered Cu and PET Thin Films from Electromagnetic Interference, Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2016