



高圧ハーネスの電磁シールド特性 ～欧州・日本の比較～

Shielding Performance of High-Voltage Wiring Harnesses
- Comparison between European and Japanese Technologies -

Ole Adam*

Ole Adam

小関 博一

Hirokazu Koseki

兒玉 博之

Hiroyuki Kodama

水谷 美生

Yoshio Mizutani

CO₂排出規制等で着目される電気自動車やハイブリッド車は、通常の12V系回路とは別に高電圧・大電流回路が必要であり、当社ではこれらに対応したワイヤーハーネス（以下、高圧ハーネス）を開発・製造している。高電圧・大電流回路では通常の12V系回路との電磁両立性（EMC: Electro-Magnetic Compatibility）のため、電磁シールド（以下、シールド）技術は高圧ハーネス開発の上で重要課題となっている。本稿では、シールド特性の測定手法として欧州で主流となっている伝達インピーダンス法による測定系構築について紹介する。また、欧州の測定手法による評価においてもアルミパイプハーネスはシールド特性に優れることを明らかにしたので、その内容についても報告する。

Electric vehicles and hybrid vehicles have a high potential to reduce CO₂ emissions. Currently we are developing and producing wiring harnesses to connect high-voltage components that are not used in conventional vehicles. For a high-voltage and large-current circuit, compatibility with the generally used 12 V system is important to avoid electro-magnetic compatibility problems, and thus, the development of shielding technology for the high-voltage wiring harnesses is essential. This paper introduces a shielding measurement system based on the transfer impedance method mainly used in Europe. The measurement test result showed that our aluminum pipe shielded wiring harness had excellent shielding performance.

キーワード：高圧ハーネス、電磁シールド、伝達インピーダンス法、電流プローブ法

1. 緒 言

近年、環境意識の高まりを背景に低燃費・低CO₂排出量をうたう電気自動車やハイブリッド車が、世界的に注目されている。欧州においては、年々厳しくなるCO₂排出量規制^{*1}に対応するため、過給機を用いたエンジンのダウンサイジングやクリーンディーゼルエンジンの技術開発が優先して進められてきた。近年、次世代エコカーとして電気自動車・燃料電池車のような電動化技術も日本と同様に積極的に開発が進められている。

電動化技術では、通常の12V系回路とは別に、モータ駆動やエネルギー回生のための高電圧回路が必要となり、当社としてもこれらに対応した高圧ハーネスを開発・製造している^{(1)~(4)}。高圧ハーネスにとって、ラジオ・GPS等の無線システムや、小信号・高速通信に対する電磁妨害を抑制するシールド技術が重要となっている。

高圧ハーネスのシールド技術開発にあたっては、そのシールド特性の測定手法は不可欠である。本稿では、シールド特性の新規測定手法として新たに構築した伝達インピーダンス法による測定システムについて紹介する。また、これらの測定システムによる測定データは、理論計算値とも高精度に一致していることを見出し、評価結果の信頼性について確認した。さらに各種高圧ハーネスのシールド特性の比較結果について報告する。

2. シールド特性測定手法

ワイヤーハーネスのシールド特性の測定手法は、間接的もしくは直接的観測手法に大別される。前者はサンプルの内部導体に信号を印加しながら、シールド層の外部に放射されるノイズをセンサー、アンテナ等を用いて間接的に検出する手法で、電流プローブ法が代表的である。後者は、シールド層に印加した信号によって内部導体に誘起される電圧を測定し、シールド層と内部導体の結合を直接的に観察する手法であり、伝達インピーダンス法が代表的である。日本では電流プローブ法が主に用いられるのに対し、欧州では伝達インピーダンス法が用いられることが多い。本章では両測定手法について説明する。

2-1 電流プローブ法

① 概 要

本手法は車載部品のシールド特性の測定手法として、国際規格CISPR25^{*2}で標準化されており、当社においても実績のある測定手法である。

② 測定システム

トラッキングジェネレーター内蔵スペクトラムアナライザ^{*3}を用いた測定システムを図1に示す。外部ノイズの影響を排除するため、測定システムは全てシールドルーム内に設置した。ノイズ検出用の電流プローブは測定周波数に応じて、低周波、高周波用の2種類のプローブを用いた。

測定システム全体で共通かつ安定したグラウンドを取るために、銅板上にサンプルをセットして測定を実施した。

測定原理は、サンプルの内部導体に信号を入力し、シールド層から外部に放射されるノイズを電流プローブで検出することでシールド特性が測定される。入力、出力信号の電力比（測定値 (dB) = 電流プローブの検出電力 / トラッキングジェネレーター出力電力）を測定し、シールド特性は、シールド品である測定サンプルと非シールド品の測定値の差分で表現される。

サンプルと測定システムの接続については、専用のアタッチメントを用いることで、様々な形態のサンプルに適用が可能である。

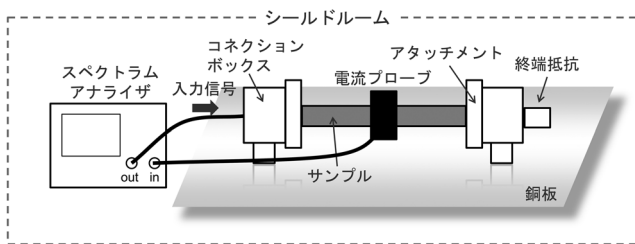


図1 電流プローブ法測定システム

2-2 伝達インピーダンス法

① 概要

本手法は同軸電線のシールド特性の測定手法として、国際規格IEC61196-1*4で標準化されており、欧州においては車載部品の一般的な測定手法である。伝達インピーダンスは図2に示すように定義される。

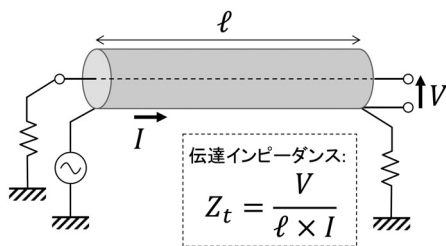


図2 伝達インピーダンスの定義

② 測定システム

測定原理は、注入線を通してサンプルのシールド層に直接信号を印加し、内部導体に誘起される電圧を出力として検出する。電流プローブ法と同様、入出力の電力比として測定することが可能である。

図3は構築した測定システムを示す。サンプルのシールド層に信号を入力するための注入線には50Ω同軸線を用い、サンプル遠端からの出力信号をスペクトラムアナライザで検出する。電流プローブ法とは異なり、共通のグラウンドは伝達インピーダンスの測定に影響を及ぼすため用いない。図3の測定システムにおいて、伝達インピーダンスは次式によって算出する。

$$Z_t = \frac{2}{\ell} \sqrt{R_0 \cdot R_3} \cdot 10^{A_T/20} \quad (1)$$

Z_t : 伝達インピーダンス(Ω/m)、 A_T : 入出力電力比(dB)、 R_0 : 注入線の終端抵抗(Ω)、 R_3 : 測定サンプルの終端抵抗(Ω)、 ℓ : サンプル長(m)

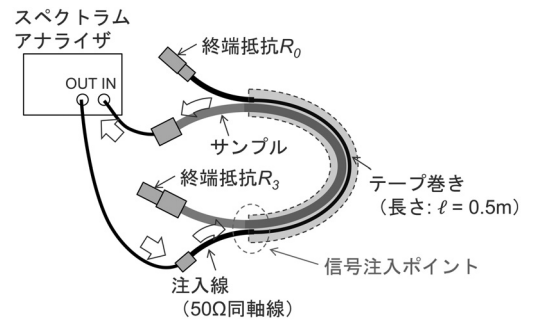


図3 伝達インピーダンス法測定システム

3. 伝達インピーダンス法測定の検証

2章で述べたように、電流プローブ法は日本カーメーカー向けに実績のある測定手法であり、当社においても十分に確立済みである。一方、伝達インピーダンス法は、高圧ハーネス用としては今回、初めて本格的に構築した測定システムであるため、その信頼性は十分に吟味する必要があった。そこでデータの信頼性についてシールド電線単体をサンプルに用いて以下のように検証した。

3-1 測定サンプル

図4は検証に用いた高圧回路用シールド電線4mm²、4mm²×2芯、16mm²の3品種の断面を示す。これらのシールド電線は高圧バッテリー回路、モータ回路等の接続に使用される。

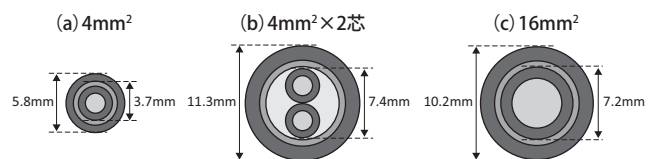


図4 シールド電線の測定サンプル

3-2 理論予測との整合

伝達インピーダンスは周波数が低くなる程、シールド層の直流抵抗が支配的になる。

$$Z_t \approx R \quad (\text{周波数が十分低い場合}) \quad (2)$$

R : シールド層の直流抵抗 (Ω/m)

表1は検証したシールド電線の10kHzでの伝達インピーダンス測定値、シールド層の直流抵抗測定値を示す。表1より、低周波数帯での伝達インピーダンスと直流抵抗はほぼ同等であることから、(2)式との整合性を確認した。

表1 伝達インピーダンスと直流抵抗測定値の比較

	伝達インピーダンス @10kHz	直流抵抗
4mm ²	12m Ω/m	12.6m Ω/m
4mm ² ×2芯	6m Ω/m	5.6m Ω/m
16mm ²	6m Ω/m	5.3m Ω/m

次に、周波数依存性を確認するため、シミュレーションモデル⁽⁵⁾による理論計算値と実測値を比較した結果を図5に示す。図5は伝達インピーダンスと周波数の関係を示しており、伝達インピーダンスが小さい程、シールド特性が優れていることを意味している。これらの比較結果から、各シールド電線において、理論計算値と測定値はほぼ一致していることを確認した。

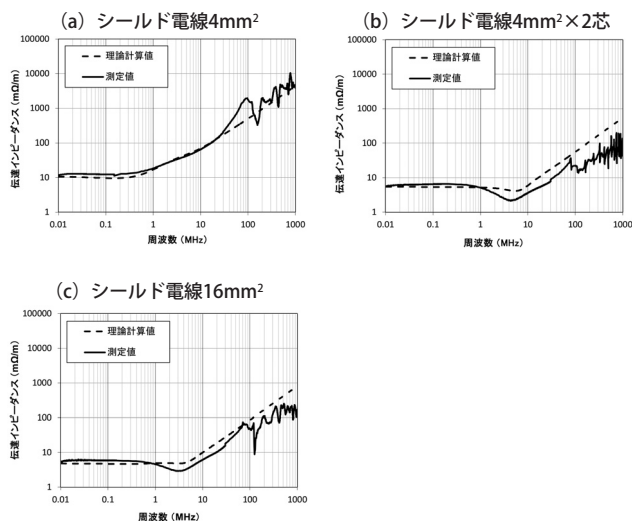


図5 理論計算値と測定値の比較

3-3 伝達インピーダンス法と電流プローブ法の相関

図6、7はそれぞれ、各種シールド電線の伝達インピーダンス法、電流プローブ法による測定結果を示す。なお、図7は、シールド特性の値が大きいほど優れていることを示している。

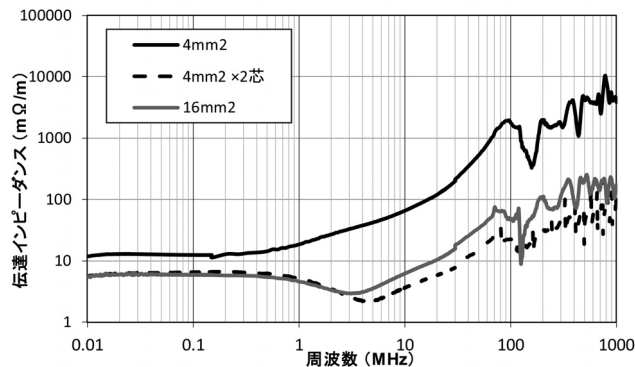


図6 シールド電線の伝達インピーダンス法による測定結果

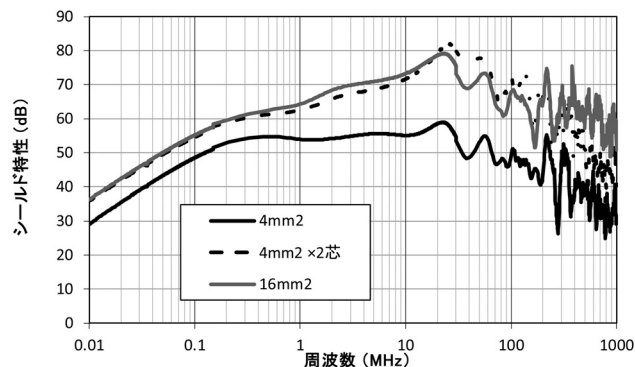


図7 シールド電線の電流プローブ法による測定結果

図6、7の測定結果を比較すると、波形（周波数依存性）自体は若干異なるものの、各シールド電線間の相対関係は類似していることがわかる。例えば、4mm²×2芯電線と16mm²電線は全周波数帯でほぼ同等のシールド特性であること、また1MHz以上の周波数帯で4mm²電線とその他の電線の特性差が顕著になる点等が挙げられる。

以上の検証より、構築した伝達インピーダンス法測定システムによる測定値は、理論計算値との矛盾は見られず、また電流プローブ法による測定結果とも良好な相関関係が得られたことから、十分に信頼性のある測定システムが構築できたと結論付ける。

4. 伝達インピーダンス法の高圧ハーネスへの適用

本来、伝達インピーダンス法はシールド電線のシールド特性を測定するために開発された手法であり、高圧ハーネスのように電線、コネクタを組み合わせた構成が複雑なサンプルの測定は前提としていない。そこで、3章で確立した測定システムを高圧ハーネスのサンプルへ適用するため、下記のように拡張することとした。

4-1 測定システム

図8は、高圧ハーネスを測定するために図3を拡張した測定システムを示す。シールド電線の測定とは異なり、シールド電線両端に組み合わせたコネクタの影響も加味した測定とするため、信号注入点を電線部からコネクションボックス端へ変更した。これにより、コネクタのシールド層であるシールドシェルにも信号が注入され、コネクタのシールド特性も含めた高圧ハーネス全体のシールド特性の測定を可能にすることができた。

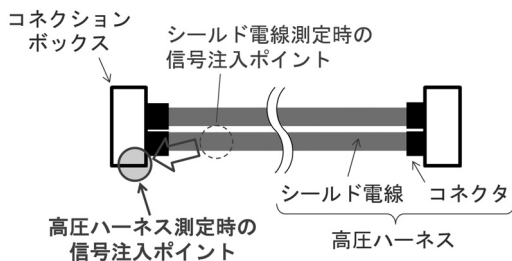


図8 高圧ハーネスの伝達インピーダンス法測定システム

4-2 伝達インピーダンスと電流プローブ法の相関

本測定では、35mm²のシールド電線の両端にコネクタA（オスメス嵌合端子構造）、もしくはコネクタB（ボルト締結端子構造）を組み合わせて2種類のサンプルを作成した。

図9、10はそれぞれ伝達インピーダンス法、電流プローブ法による測定結果である。これらの測定結果を比較すると、3-3節と同様に、両者の測定結果は良く一致していることがわかる。

1MHz以下の周波数帯では、シールド電線単体と高圧ハーネスを比較すると、顕著な差は見られない。一方、1MHz以上の周波数帯では、シールド電線単体より高圧ハーネスの方に特性低下が現れることが、両測定手法の結果から確認できる。

これらの要因としては、1MHz以下ではシールド電線のシールド層とコネクタのシールドシェルとの接続が低接触抵抗を有していること、1MHz以上ではコネクタのシールドシェルからのノイズ放射が考えられる。さらに2種類のコネクタの比較では、僅かではあるが、コネクタBの方が優れている。これはコネクタBのシールドシェルが一体構

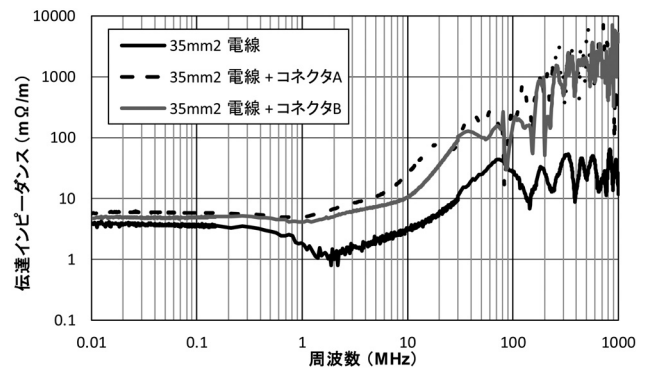


図9 高圧ハーネスの伝達インピーダンス法による測定結果

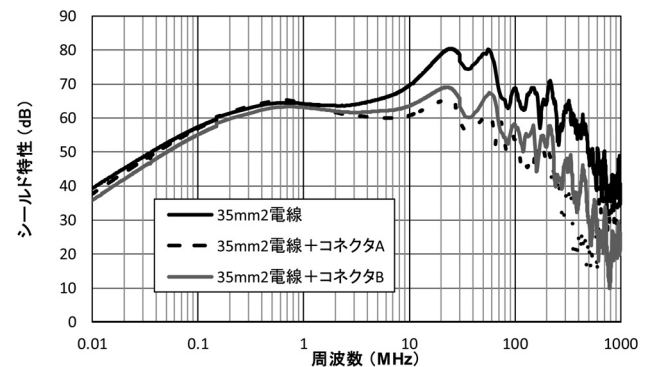


図10 高圧ハーネスの電流プローブ法による測定結果

造であるのに対し、コネクタAはシールドシェルが分割構造になっており、シールドシェル間の接続が悪影響を及ぼしているものと推測される。これらのコネクタ間の微小な特性差についても、両測定の結果は一致しており、これらから伝達インピーダンス法においても、コネクタ部の影響も反映した測定が可能であると言える。

上記より、伝達インピーダンス法がシールド電線単体だけでなく、コネクタを有する高圧ハーネスの測定にも適用可能とした。

5. 高圧ハーネスのシールド特性比較

本章では、前章で述べた伝達インピーダンス法測定システムによる各種高圧ハーネスの測定結果を報告する。

高圧ハーネスは、それぞれの回路を個別にシールドする各芯シールド構造と、全回路をまとめてシールドする一括シールド構造の大きく2種類に大別できる。現在は、欧州カーメーカー（主にドイツ系カーメーカー）は前者、日本カーメーカーは回路の種類にもよるが後者の構造を採用することが多い。

一括シールド構造には、シールド材として金属編組線を

用いた一括編組シールド⁽²⁾と、金属パイプを用いたパイプシールドがある。特にアルミパイプを用いたアルミパイプシールド^{(3)、(4)}は、シールド特性以外にも機械的保護、遮熱性に優れており、高圧ハーネスに最適な構造である。また、アルミパイプシールドでは、車両の組み付け性（作業性、製造公差吸収等）を考慮して、アルミパイプ両端あるいは片端に編組線によるフレキシブル部を設けた構成としている。

図11は、測定に用いた各芯シールド、一括編組シールド、アルミパイプシールドの各種高圧ハーネスを示す。

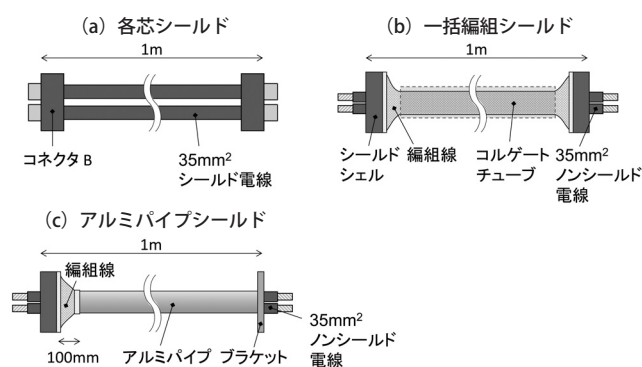


図11 測定に用いた各種高圧ハーネス

図12は、伝達インピーダンス法測定システムを用いて、各種高圧ハーネスのシールド特性を測定した結果を示す。これらの測定結果から、アルミパイプシールドは10kHz～1GHzと広い周波数帯において、代表的な3種類の高圧ハーネスの中で最も優れたシールド特性であることがわかる。また100kHz以下の周波数帯では、一括編組シールドが比較的良好であり、1MHz以上の周波数帯では、各芯シールドがアルミパイプシールドとほぼ同等のシールド特

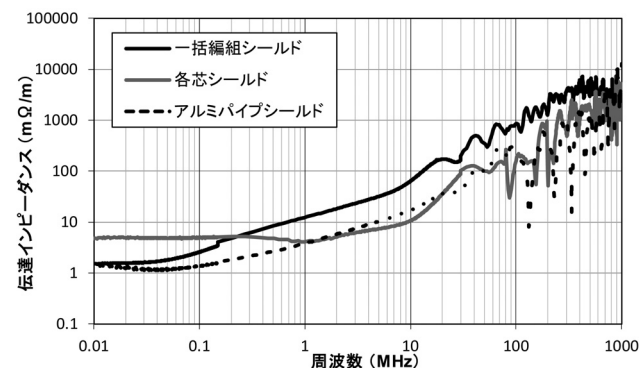


図12 各種高圧ハーネスの伝達インピーダンス法による測定結果

性であることを確認した。

一般的に、周波数が低い領域では、3-2節で述べたようにシールド特性はシールド層の直流抵抗が支配的である。一方、周波数が高くなる程、シールド特性は“シールド層の面密度が高い=電線表面を隙間なく覆う”構造が有利になる傾向があると考えられる。アルミパイプシールドはどちらの周波数領域においても有効なシールド構造であることを本測定から確認することができた。

6. 結 言

- ① 高圧ハーネスのシールド特性の測定手法のひとつとして、伝達インピーダンス法による測定システムを確立した。
- ② 各種高圧ハーネスを測定した結果、アルミパイプシールドが最も優れたシールド特性を有していることを確認した。

*本開発は、Sumitomo Electric Bordnetze GmbHのウォルフスブルグ開発センター（ドイツ）において、同社のThomas Flottmann博士、Marcin Zwolinski氏によるサンプル製作、測定指導など、多大なご協力のもと実施した。

用語集

※1 CO₂排出量規制

欧州委員会（EC）は、2015年までに欧州で販売される自動車の1台あたりの平均CO₂排出量を120g/kmまでに規制することを定めている。また、2020年までにはさらに95g/kmにまで引き下げることが検討されている。

※2 CISPR25

IECに設けられた特別委員会である国際無線障害特別委員会（CISPR: Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques）が作成した「車載受信機保護のための妨害波の限度値及び測定法」に関する規格。

※3 トラッキングジェネレーター内蔵スペクトラムアナライザ
信号強度-周波数スペクトラム解析を行い、電気信号に含まれる周波数成分検出を行う測定機器。トラッキングジェネレーターはスペクトラムアナライザの周波数掃引に同調した信号を出力することができる。

※4 IEC61196-1

通信用同軸電線に関するIEC（International Electrotechnical Commission）規格。

参 考 文 献 -----

- (1) 「新型ハイブリッド車に高圧ハーネスが採用」、SEI WORLD vol.340、(Jan. 2006)
 - (2) 宮崎正、紀平宗二、野崎隆男、「プリウス用高圧ハーネスの新ワールド構造～トヨタ自動車(株)原価改善優秀賞受賞～」、SEIテクニカルレビュー第167号、pp.17-20 (Sept. 2005)
 - (3) Y.Mizutani, O.Weiss, "Pipe Shield High-Voltage Wiring Harness," 26th International Electric Vehicle Symposium, Los Angeles, California (May 2012)
 - (4) 井谷康志、水谷美生、桑原正紀、橋本章吾、「高圧アルミパイプハーネス」、SEIテクニカルレビュー第185号、pp.14-17 (July 2014)
 - (5) T. Kley, "Optimized Single-Braided Cable Shields," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. EMC-35, no.1 (February 1993)
-

執 筆 者 -----

Ole Adam* : SEI ANTech-Europe GmbH
プロジェクトエンジニア



兒玉 博之 : SEI ANTech-Europe GmbH
プロジェクトエンジニア



水谷 美生 : (株)オートネットワーク技術研究所
HV研究部 主席



小関 博一 : SEI ANTech-Europe GmbH
ゼネラルマネージャー



*主執筆者