

高圧ワイヤーハーネスの電磁ノイズ解析

Electromagnetic Noise Analysis of High-Voltage Wiring Harnesses

須永 圭*
Kei Sunaga

宮島 光治
Koji Miyajima

宮崎 順之
Yoshiyuki Miyazaki

ハイブリッド（HEV）自動車や電気（EV）自動車のインバータやモーターを接続する高圧ワイヤーハーネスは、高出力の交流電流が流れる。その時に発生する電磁界が周辺部品に対して影響を及ぼすため、シールド設計を実施している。そのため、高圧ワイヤーハーネスが周囲に作る電磁ノイズの予測が設計上重要となり、その予測手段の一つにCAE解析技術がある。本論文では高圧ワイヤーハーネスの放射ノイズ評価に電磁界CAE解析を適用した事例を紹介し、電圧・電流と周囲の電磁ノイズの関係を考察する。

High-voltage wiring harnesses that connect an inverter to a motor in a hybrid car need to be designed to suppress electromagnetic emissions that can interfere with other electric devices nearby when alternating currents flow through the wires. To address this issue, we have studied the application of computer-aided engineering (CAE) analysis to the electromagnetic shielding design of these harnesses. This paper reports an example application of CAE analysis to the estimation of noise emissions and discusses relationships between the electromagnetic field and voltage or current in the system.

キーワード：ワイヤーハーネス、ハイブリッド自動車、電磁界ノイズ、CAE解析、シールド

1. 緒言

近年、ハイブリッド電気自動車（HEV）および電気自動車（EV）が増加しており、当社（住友電装㈱）はHEV、EVで用いられる低圧及び高圧のワイヤーハーネス^{*1}を開発し、製品化している。高圧ワイヤーハーネスは、**図1**に示すように、HEV、EVに搭載されているバッテリーとインバータとモーターの間を繋ぐワイヤーハーネスであり、高電圧・大電流にて使用される。

ワイヤーハーネスは高い信頼性が要求されており、その信頼性の一つにEMC^{*2}特性（電磁環境両立性）がある。特に、インバータとモーターを繋いでいる高圧ワイヤーハーネスの電線には高い交流電圧・大きな交流電流が発生するため、それらに起因する電磁界ノイズが周囲の電装品を誤動作させる等の悪影響を及ぼす可能性があり、このような

電磁界ノイズを抑えるような信頼性設計が必要となる。

当社は、開発段階における信頼性の確保・向上を主な目的として、設計初期段階でのCAE^{*3}の活用を推進している。現在、ワイヤーハーネスの屈曲耐久性（繰り返し屈曲された時の断線寿命の予測）や、保護材であるグロメットの挿入力・離脱力評価等でCAE解析を活用している。インバータとモーターを繋いでいる高圧ワイヤーハーネスの電磁界ノイズ評価に対しても、CAEの適用検討を進めている。本稿では、高圧ワイヤーハーネスの放射ノイズ評価を模擬したCAE解析の開発状況を報告する。

2. 高圧ワイヤーハーネスの放射ノイズ評価

HEV、EVで使われる高圧ワイヤーハーネスの一般的な概略構造を**図2**に示す。三相交流を伝達するための3本の電線の片端にはインバータと、逆端にはモーターと、それぞれ接続可能な端子を設け、この両端で一体化された3本の電線と、ノイズ防止用のシールド部材で構成される。ワイヤーハーネスは、一般には自動車内で曲げられた状態で収納されるため、シールド部材の電線を覆う部分には曲げやすいように金属性の編み線等を使い、その両端に付けた板状の金属製コネクタを介してインバータやモーターと固定する。

ワイヤーハーネスを含んだHEV、EVの電装系のEMC特性は、最終的に各自動車メーカーにて車両組み付け状態で評価される。ワイヤーハーネスを含む部品サプライヤーにおいても部品単体にて評価を行って、国際規格を参考に各

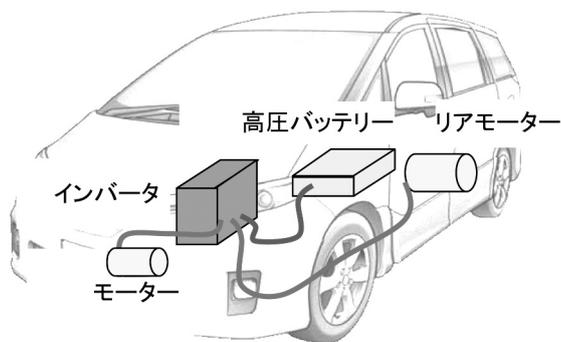


図1 高圧ワイヤーハーネスの配線図

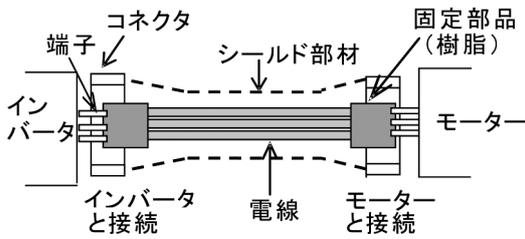


図2 高圧ワイヤーハーネスの概略構造図

自動車メーカーが定めた仕様を満たす必要があるため、各サプライヤーでも独自にEMC評価技術を構築している。

高圧ワイヤーハーネスの放射ノイズ評価試験系の概念図を図3に示す。作業机上にはグランドプレーンと呼ばれる金属板が敷かれており、この上に固定された2つの金属筐体に高圧ワイヤーハーネスを接続する。片側の端子には交流電源を、反対側の端子には終端抵抗をそれぞれ接続する。

図3(a)は、高圧ワイヤーハーネスのシールド部材を外したときの評価系であるが、交流電源によって評価系に生じた電圧や電流が原因となって周囲の空間には電磁界が発生する。このような状態で所定の位置にプローブ(アンテナ)を設置し、交流電源の周波数を変化させながら、電界/磁界ノイズを測定する。

図3(b)はシールド部材を装着したときの評価系であるが、シールド部材によって周囲の空間に生じる電界、磁界は減少する。2つの評価系で測定されたノイズ量の差をdB表示したものはシールド効果と呼ばれ、ワイヤーハーネスの放射ノイズ特性の評価指標として用いられる。評価周波数帯域は一般に10kHzから1GHzである。

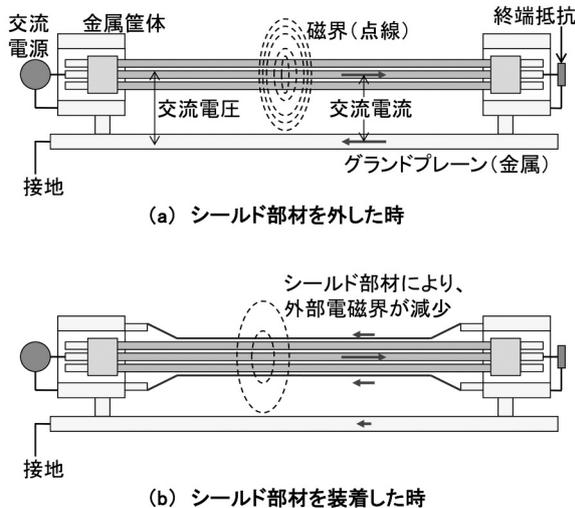


図3 高圧ワイヤーハーネスの放射ノイズ評価系

3. ワイヤーハーネスの電圧・電流と電磁ノイズ

ワイヤーハーネスの評価系に電圧・電流が生じると、周囲の空間に電界や磁界が生じる。ワイヤーハーネスの電圧・電流とその周囲の電磁ノイズの関係を考察するため、以下ではその基礎となる理論を紹介する。

まず、電界や磁界のノイズ源となる電荷・電流分布は、図4に示す2つの型に大別される。

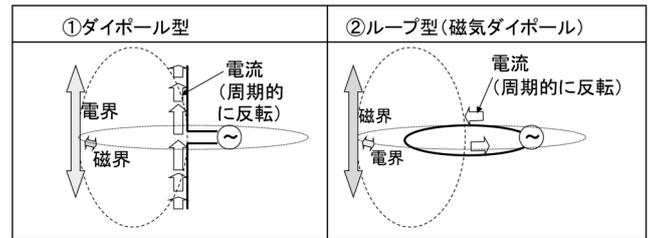
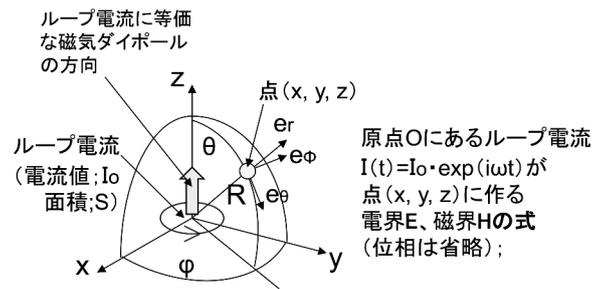


図4 電界・磁界のノイズ源となる電荷・電流分布の2つの型

ダイポール型は、直線状のアンテナのような電荷・電流分布に相当する。ループ型は閉じたループ状の電流分布に相当する。2つのノイズ源は、その近傍で図4に示す方向の電界、磁界を生じる。ループ型が周囲に作る電界、磁界の理論式を図5に示す。図5の原点から測定点までの距離Rの3乗に反比例する項を準静界、2乗に反比例する項を誘導界、1乗に反比例する項を放射界と呼ぶ。

図4のループ型のときの磁界の方向は、図5の理論式における $\theta = 90^\circ$ の磁界が、r方向でゼロ($\cos \theta = 0$)になる。



$$E = -(\mu_0 \cdot I_0 \cdot S / 4\pi) \cdot (i\omega / R^2 - \omega^2 / cR) \cdot \sin\theta \cdot e_\phi$$

$$H = (I_0 \cdot S / 2\pi) \cdot (1 / R^3 + i\omega / cR^2) \cdot \cos\theta \cdot e_r + (I_0 \cdot dS / 4\pi) \cdot (1 / R^3 + i\omega / cR^2 - \omega^2 / c^2 R) \cdot \sin\theta \cdot e_\theta$$

μ_0 = 真空の透磁率、 ω = 角周波数(=2 πf)、 c = 光速
 e_r, e_θ, e_ϕ は、それぞれ、 r, θ, ϕ 方向の単位方向ベクトルを表す

図5 ループ型の電流が周囲に作る電界E、磁界Hの理論式

り、 θ 方向で大きくなる ($\sin \theta = 1$) 状況を反映したものである。

一方、ダイポール型が周囲に作る電界、磁界の理論式は、ループ型に対する理論式で、磁気ダイポールの大きさ $I_0 \cdot S$ (I_0 : 電流、 S : ループの囲む面積) をダイポールの大きさ $q_0 \cdot l$ (q_0 : 電荷、 l : 電荷間の距離) に置き換えて、電界と磁界を交換した式 (係数と負号は変化) となり、図4の左に示すような電界、磁界になる。

このようにダイポール型とループ型のノイズ源が周囲に作る電界、磁界は互いに入れ替わった関係にあるが、距離 R と波長 λ の関係が、 $R > \lambda/2\pi$ となる場合には、理論式における放射界が支配的になり、いずれの型でも電界と磁界の比は同じ値 (376.7Ω) になる。

一方、 $R < \lambda/2\pi$ となる場合には、理論式における準静界、誘導界が支配的となり、このときの電界と磁界の比は、放射界が支配的な場合と比べて、ダイポール型では電界が大きく、ループ型では磁界が大きくなる。そのため、2つの型が同時に存在する場合、近傍位置 ($R < \lambda/2\pi$) では、電界に対してはダイポール型が、磁界に対してはループ型が、主なノイズ源となっている可能性が高くなるものと考えられる。

以上の関係を基に、高圧ワイヤーハーネスの放射ノイズ評価における電界・磁界ノイズについて考察する。まず、測定位置が高圧ワイヤーハーネスから約1mの位置では、上記の関係 ($R < \lambda/2\pi$) より、周波数が30MHz以下で電界はダイポール型、磁界はループ型が主な源になると考えられるが、ループ型の主要な源は、高圧ワイヤーハーネスとグランドプレーンがなすループの電流である (図6)。

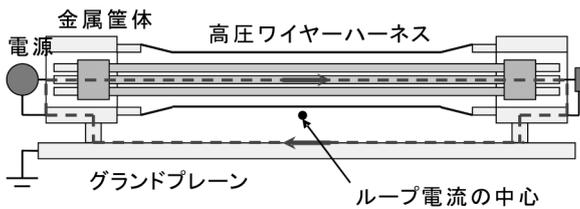


図6 高圧ワイヤーハーネスの放射ノイズ評価系におけるループ電流の経路 (点線部)

高圧ワイヤーハーネスの放射ノイズ評価系を伝送線路とみなした場合、電線を往路、シールド部材を複路とするノーマルモードと、電線 (あるいはシールド部材) を往路、グランドプレーンを複路とするコモンモードがある。前者のモードが外部に作る磁界は小さい (理想的な同軸ケーブルならゼロ) ため、磁界ノイズ抑制にはループ電流 (コモンモード電流) の低減や、ループ電流の囲む面積を小さくすることが効果的になると考えられる。

一方、電界は先述のようにダイポール型が支配的になると考えられるため、高圧ワイヤーハーネスとグランドプレーンとの電位差が主なノイズ源になる。この電位差に対応して生じる電荷がダイポールとなり周囲の空間に電界を生じるため、電界ノイズ抑制には、この電位差をなくすることが効果的であると予想される。

4. 電磁界CAE解析

4-1 解析手法

放射ノイズ評価系の電界ノイズや磁界ノイズは、ワイヤーハーネスを含む回路の電圧や電流の分布で決まる。これらの電圧・電流分布を予測する手法としては、多導体系の分布定数回路論の応用等が考えられる。しかし、複雑な形状のワイヤーハーネスや金属筐体などにどのような回路定数を用いるべきか明らかでなく、単純な理論式のみでの解析は精度的に限界がある。

そこで理論式による机上計算に代わるものとして、電磁界CAE解析の活用を考え、各種解析手法や市販の電磁界CAE解析ソフトを調査した。表1に市販の電磁界CAE解析ソフトで用いられている主な解析手法の特徴を示す。

表1 主な電磁界解析手法の特徴

	有限要素法	モーメント法	FDTD法
計算領域	主に周波数	周波数領域	時間領域
要素分割	3次元形状	線状・面状	3次元格子
主な長所	任意形状のモデル化が可能	周囲の空間の要素分割は不要	任意媒質のモデル化が可能
得意分野	複雑な形状の解析	アンテナ等の解析	大規模解析 (並列計算)

ひとつめの有限要素法は、解析対象の幾何学的形状を比較的忠実に再現したモデル化ができる。従って、微細な形状変化の影響を見るのに適した手法だが、対象のみならず電磁界が伝播する周りの空間も要素分割が必要である。

これに対しモーメント法では、対象のみを要素分割すればよい。まず導体部の電流を求め、その結果と既知の伝搬関数を使って空間の任意の点の電磁界を求めるため、比較的安価な計算コストで広い帯域の計算ができる。しかし、立体的な形状や誘電体を含む解析にやや難がある。

一方FDTD法 (時間領域差分法) は、空間を格子状に分割する時間領域の解法で、バルク形状や誘電体をモデル化しやすく、高周波パルスを用いた一回の解析で、対応する周波数帯域に対する結果が同時に得られる。しかし、周波数の減少に伴い計算上の現象時間を長く設定する必要があるため、低周波で計算コストが増大する。

当社はワイヤーハーネスのシールド特性の予測を狙い、比較的計算時間をかけずに広い帯域の計算が可能なモーメント法と、高周波の計算が得意なFDTD法のソフトを導入し、高圧ワイヤーハーネスの放射ノイズ評価系を模擬したCAE解析を行った。

主にモーメント法の解析ソフトで行った解析事例を中心に、実験結果との比較結果を報告する。

4-2 高圧ワイヤーハーネスの電磁界解析

図3に示した放射ノイズ評価系を模擬した計算をモーメント法の解析ソフトで行うにあたっては、高圧ワイヤーハーネス、金属筐体、グランドプレーンの形状モデルを作成し、評価する電磁界の波長よりも十分小さな寸法サイズで要素分割を行う。特に電磁界が急激に変化するような箇所では、要素分割を細かくする必要がある。

次に、2次元形状でモデル化した部分に、厚さ、導電率、透磁率を入力し、電源や抵抗を設定して、解析を実行する。

高圧ワイヤーハーネスから距離1mの位置での磁界について、構造が異なる2種類の高圧ワイヤーハーネス（A、B）に対して計算したCAE結果（モーメント法）と実測結果の比較を図7と図8に示す。シールド部材を装着したときの絶対値について、CAEの方が若干大きめに出るとい

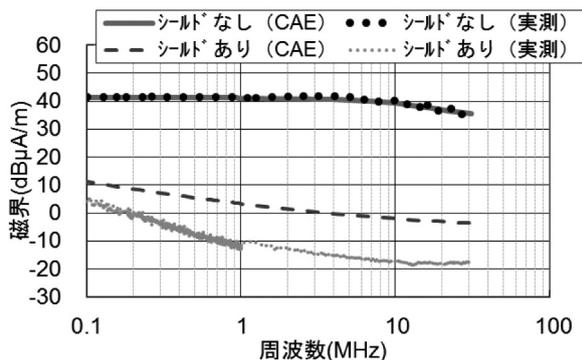


図7 高圧ワイヤーハーネスから距離1mの位置の磁界 (高圧ワイヤーハーネスA)

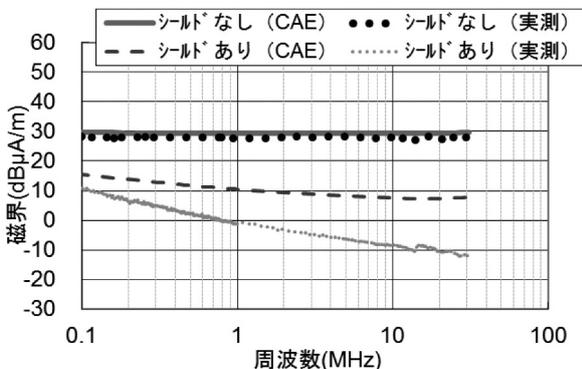
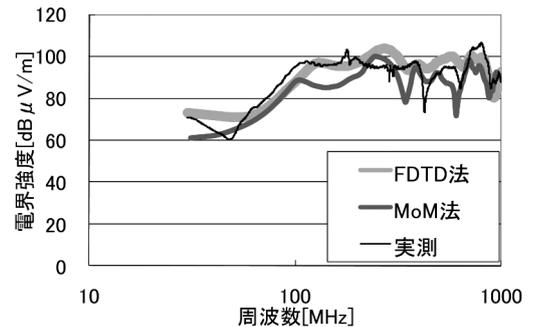


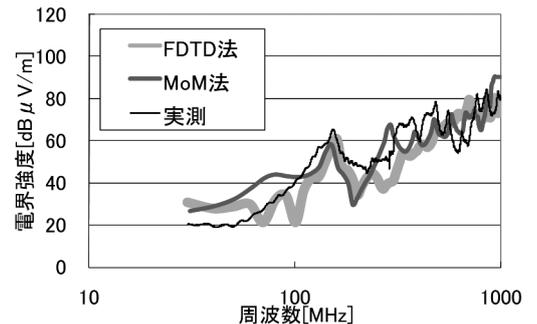
図8 高圧ワイヤーハーネスから距離1mの位置の磁界 (高圧ワイヤーハーネスB)

差違はあるものの、大域的な周波数依存性や、高圧ワイヤーハーネスの優劣（高圧ワイヤーハーネスAの方が、シールド効果が高い）は、実測と整合した。

次に、高周波数帯域（30MHz～1GHz）において、高圧ワイヤーハーネスから距離1mの位置の電界をFDTD法とモーメント法で計算した結果を図9に実測結果と併せて示すが、局所的に多少の差違はあるものの、どちらの解析手法でも実験と類似した周波数依存性が得られた。



(a) シールド部材なし



(b) シールド部材装着

図9 高圧ワイヤーハーネスから距離1mの位置の電界

以上のように、市販の解析ソフトを用いた電磁界CAE解析により、高圧ワイヤーハーネスの放射ノイズ評価系の電界/磁界ノイズの傾向をある程度予測できることが実験との比較を通してわかった。電磁界CAE解析の利点の一つとして、実験での測定点以外の電界、磁界の情報が得られることが挙げられる。

主な市販の解析ソフトは、電界や磁界の強度分布を色付けて図示する（コンター図表示）機能を備えており、電界、磁界の伝搬の様子を可視化して捉えることができる。図10にグランドプレーンの上から見た電界強度コンター図の例を示す（電線と同じ高さの平面上で、図10の下側だけコンター表示している）。

図10の事例では、終端側筐体近傍の電界が特に大きいこ

とがコンター図からわかる。このような可視化によって高圧ワイヤーハーネスから観測点までの電界・磁界の伝搬の様子を捉えることができるため、シールド不具合発生時の対策を立案しやすくなり、製品開発においてCAE解析を活用することができる。



図10 電界強度コンター図の例
(上面視。濃い部分が強度大)

5. 結 言

ハイブリッド電気自動車用の高圧ワイヤーハーネスの放射ノイズ評価系を紹介し、それを模擬した電磁界CAE解析を行って実験結果と比較し、その大域的周波数依存性が一致することを確認した。また、交流電流が周囲に作る電界／磁界の理論式を参考にして、伝送線路としてみた高圧ワイヤーハーネス評価系に生じている電圧／電流と近傍電界／近傍磁界の関係について考察した。

今後もCAEと実験との整合性確認を進め、ワイヤーハーネスのシールド設計技術の確立に繋げてゆきたい。

用語集

※1 ワイヤーハーネス

自動車や複写機・プリンタ等に搭載された電子部品や電装品を電氣的に接続し、相互の電力や情報の伝送を中継する組み電線のこと。電線と保護材で構成されている。ワイヤーハーネスを構成する電線の1本1本の役割としては、電源をとるもの、信号を伝達するもの等がある。

※2 EMC

Electro-Magnetic Compatibilityの略語で、電磁両立性と訳される。電子機器（電線等を含む）から放出された電磁妨害波が他の電子機器に障害を与える現象を考えたとき、放出する側の特性をエミッション（放射）特性、障害を受ける側の耐性をイミュニティ（免疫）特性と呼ぶ。

※3 CAE

Computer Aided Engineeringの略語で、コンピュータによる設計支援のこと。本稿では、解析対象の形状データや物性等を入力とし、現象を記述する基礎方程式を数値処理しやすいように近似したうえでコンピュータを用いて解き、評価したい各種の物理量を出力として得ることで、製品設計の指針を決めるのに役立つような開発支援システムを指す。

参 考 文 献

- (1) C.Paul, Analysis of Multiconductor Transmission Lines, pp136-156, Wiley, New York (1994)
- (2) 澁谷昇、高橋丈博、櫻井秋久 監訳、「EMI/EMCのための数値計算モデリング技術」、三松出版 (2006)
- (3) 森下久、「小型アンテナの基礎」、PP14-18、コロナ社 (2011)
- (4) 結石友宏、「電磁界解析と製品開発への応用」、SEIテクニカルレビュー第175号 (2009)
- (5) 結石友宏、「電磁界解析の理解のための電磁気学理論」、SEIテクニカルレビュー第178号 (2011)

執 筆 者

須永 圭*：住友電装(株) 開発実験部 主幹



宮島 光治：住友電装(株) 開発実験部 主幹



宮崎 順之：住友電装(株) 開発実験部 部長



*主執筆者