

車載インバータの電磁ノイズ設計を実現する 車両まるごと解析技術

船戸 裕樹
Funato Hiroki

李 ジャア
Li Jia

高橋 昌義
Takahashi Masayoshi

Hua Zeng

方田 勲
Hoda Isao

坂本 英之
Sakamoto Hideyuki

齋藤 隆一
Saito Ryuichi

自動車の安全性・快適性を確保するため、車載電子機器は電磁ノイズ干渉を抑制する必要がある。このため、車両メーカーは車載電子機器メーカーにノイズ規格への適合を義務付けているが、電磁ノイズの挙動は機器が搭載される環境によって変化するため、機器単体でノイズ規格に適合していても車両に組み込まれるとノイズ量に変化し、車両のノイズ規格適合のための追加対策が発生することがある。そこで、事後になりがちであった電磁ノイズ対策を上流設計段階で作り込むべく、電子機器を搭載し

た車両全体の電磁ノイズ予測を可能とする車両まるごと解析技術を開発した。車載アンテナへの電磁ノイズ混入量について、駆動用インバータの大電力出力(kW)から微弱な電磁ノイズ(μW)まで広ダイナミックレンジな車両解析を3段階に分けて行うことで個々の解析が取り扱うダイナミックレンジを小さくし、設計適用に実用的な精度(± 12 dB以内)でノイズ量を予測可能とした。これにより、電子機器の設計段階で車両搭載時の電磁ノイズ抑制設計を実現できる見込みを得た。

1. はじめに

自動車の電動化や情報網連携技術の進展に伴い、車載電子機器の数は年々増加している。これら電子機器の動作に伴って発生する電磁ノイズが、車載ラジオなどほかの電子機器に電磁干渉しないよう、車載電子機器メーカーは機器単体でノイズ試験を、車両メーカーは車両ノイズ試験をそれぞれ行う^{1), 2)}。

車載インバータの放射電磁ノイズ試験の例を図1(左)

に示す。機器単体のノイズ試験では、自動車のシャシーを模擬した金属板の上に試験対象であるインバータやケーブルを設置し、これら機器近傍に設置したアンテナに誘起する電圧を測定することで放射ノイズ量を評価する。ケーブル配置や測定用アンテナ位置は国際規格(CISPR25)で規定されており、例えば放射ノイズ試験ではケーブルから距離1mの場所に設置したアンテナへ誘起する電圧を測定する。一方、車両試験は実際の製品車両を用いて行われる

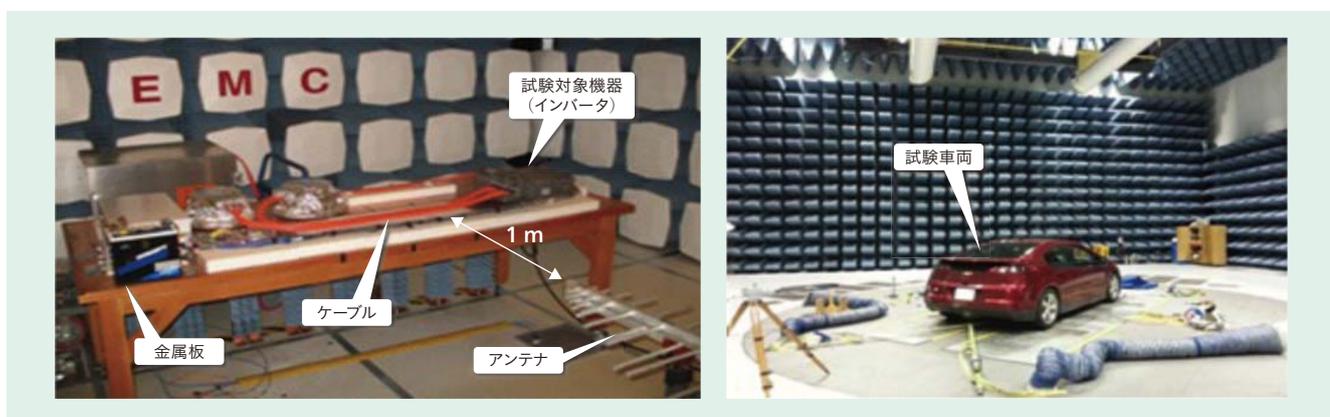


図1 車載電子機器のノイズ試験(左)と車両ノイズ試験(右)

機器のEMC (Electro-magnetic Compatibility) 試験は規格に基づいてケーブルやアンテナを配置する。車両試験は実際の製品車両を用いるため、電磁ノイズの発生・伝播(ば)環境が車両ごとに異なり、機器の試験と必ずしも一致しない。

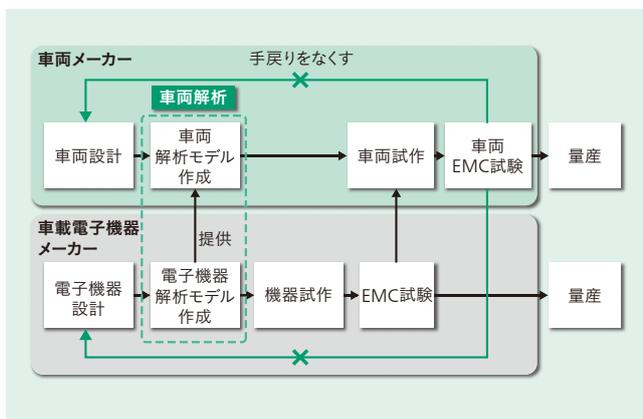


図2 | 車載電子機器と車両の開発フロー

車両EMC試験は機器のEMC試験後に行われるため、ノイズ問題が起きると設計変更のため追加のコストと期間が発生してしまう。

[図1(右)参照]。車両の放射電磁ノイズ試験には大別して、車外に設置した試験用アンテナへの誘起電圧を測定する放射電磁ノイズ試験と、ラジオなど車載アンテナへの混入ノイズ試験の2種類がある。これら車両試験では、アンテナ配置やボディ形状が車両ごとに異なるため、電磁ノイズの発生・伝播(ば)環境が車両によって大きく異なる。機器単体のノイズ試験は、実車両での機器実装状態を模擬するよう事前に綿密な検討を行うが、製品車両と電磁ノイズの挙動は必ずしも一致しない。すなわち、機器単体のノイズ試験に適合しても、車両試験において車載アンテナへの電磁干渉問題が発生するリスクがある。通常、車両電磁ノイズ試験は電子機器試験の後に行われるため、追加対策が発生した場合、電子機器あるいは車両の設計変更により、追加のコストおよび期間が発生する問題がある。これは車載電子機器メーカーだけでなく、車両メーカーにとっても大きな損失となる。

そこで、日立は米国General Motors Company(以下、「GM」と記す。)と共同で、電子機器の車両実装状態における電磁ノイズ量予測を目的に、インバータを含めた車両全体の電磁ノイズ解析モデルを構築し、実車を用いて精度検証した。電子機器の設計段階で車両搭載時のノイズ量を予測することで、低ノイズ化設計を実現できる(図2参照)。なお、本研究では解析対象にGMの電気自動車(Volt)を用いた。Voltは2機のモータ、高電圧バッテリーおよびこれらを接続する高電圧シールドケーブルとともに日立製の車両駆動用インバータを備えており、車両実装状態のインバータノイズの解析という目的には適している。

2. インバータの電磁ノイズ発生メカニズム

ハイブリッド電気自動車の駆動用インバータは、数百ボルトの直流電圧をIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)など半導体のスイッチングによって交流電流に変換し、

モータを駆動する装置である。この半導体のスイッチング周波数はkHz程度であるが、電圧切り替え時に発生する高周波成分はMHz以上に及ぶ。また、インバータはkW以上の電力を出力するのに対し、漏洩(えい)ノイズが電磁干渉を起こさないためには漏洩ノイズ量をおよそ μW 以下と非常に小さい値にする必要があるため、インバータとモータおよび高電圧バッテリーとを接続するケーブルは一般的にシールドケーブルを用いる。

3. 車両全体電磁ノイズ解析

車両全体電磁ノイズ解析の技術課題は、インバータの大電力動作(kWレベル)から微弱な放射電磁ノイズ(μW レベル)まで広いダイナミックレンジを取り扱う高精度解析の実現である。この広ダイナミックレンジ解析には、9桁(180 dB)に及ぶ精度保証が求められ、3桁(60 dB)程度を扱う通常の解析では正確な解を求めることが困難である。そこで、この問題を解決するため、電磁ノイズ放射が車両ボディへの漏洩電流によって発生するというメカニズムに基づく車両全体解析フローを開発した³⁾。すなわち、(1)インバータ動作解析、(2)漏洩電流解析、(3)放射電磁ノイズ解析という3段階に分けて車両解析を行うことで、個々の解析が取り扱うダイナミックレンジを小さくし、高精度化を実現する(図3参照)。

次に、これら分割した解析を説明する。1番目に、等価回路解析によってインバータが出力するモータ駆動電流の高周波成分を計算する。求めたインバータ高周波電流を I_N とする。2番目に、インバータの高速スイッチングによって発生した高周波電流(I_N)のうち、車両ボディへ漏洩する電流量を電磁界解析で求める。漏洩電流分布はケーブル

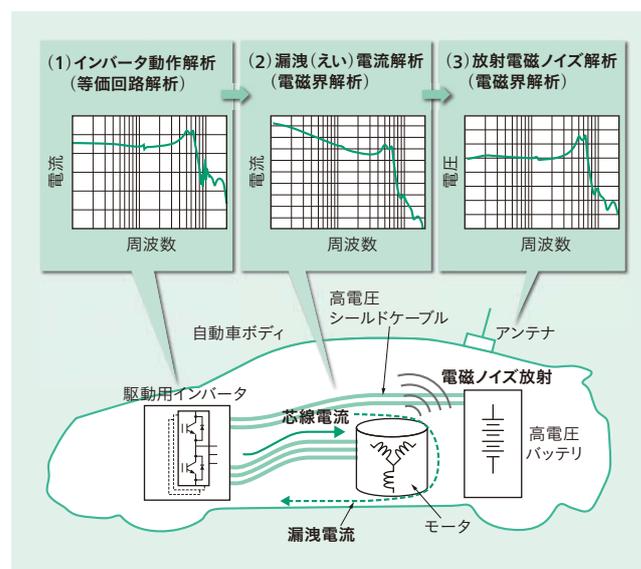


図3 | 車両全体解析フロー

車両全体解析を3つに分割することで高精度化を実現する。

近傍の金属形状で決まるため、この狭い空間のみを解析する。この解析により、インバータ出力電流のうち車両ボディへ漏洩する電流の比（漏洩電流発生係数） K_1 を得る。3番目に、ボディに漏洩した電流によって発生する電磁ノイズがアンテナに干渉する量を求めるため、漏洩電流を励振源として与え、車両内外の電磁ノイズ伝播とアンテナ誘起電圧を電磁界解析する。この解析により、漏洩電流から車両設置アンテナまでの放射ノイズ伝播係数 K_2 を得る。以上より、得られたインバータ出力電流 I_N と漏洩電流発生係数 K_1 および放射ノイズ伝播係数 K_2 によって車両設置アンテナへの誘起電圧 V_A を求めることができる（式1）。

$$V_A = I_N \times K_1 \times K_2 \quad (\text{式1})$$

このように放射ノイズが高周波漏洩電流によって発生するという既知のメカニズムに着眼し、車両解析を分割することで、個々の解析が取り扱う電力のダイナミックレンジを約3桁（60 dB）以下に小さくし、一般的な電磁界解析ソフトウェアを用いた高精度解析を実現できる。また、アンテナ位置のみを設計変更した場合は、放射伝播係数（ K_2 ）のみ再解析すればよく、上流設計で必要となる繰り返し解析の効率を向上できる。

放射伝播係数（ K_2 ）の解析に用いた車両モデルを図4に示す。アンテナはEMC（Electro-magnetic Compatibility：電磁両立性）試験用のモノポールアンテナを用いた。また、車両解析の正当性を検証するため、アンテナ位置はルーフ上および車両前方という2つの条件で解析し、結果を実測

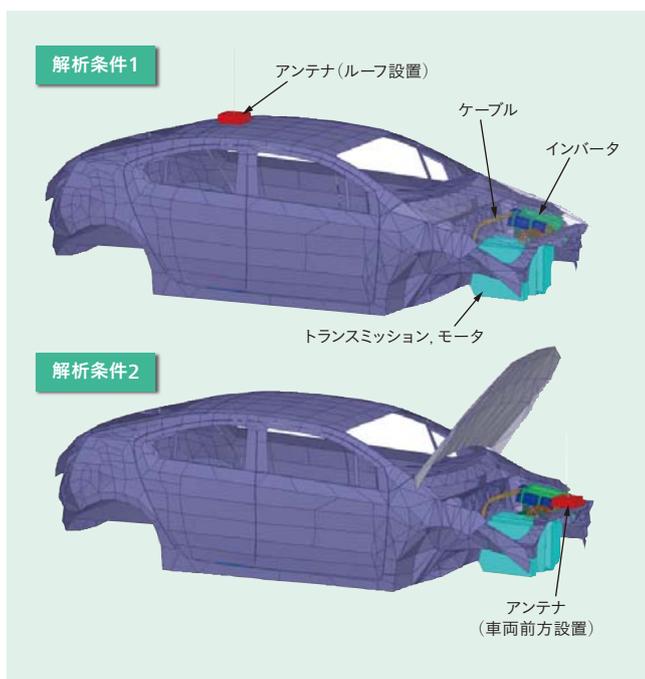


図4 | 放射電磁ノイズ解析モデル

アンテナ位置によって異なるノイズによる誘起電圧を解析で検証するため、2か所のアンテナ位置条件で車両解析を実施した。



図5 | 電磁ノイズ測定専用車両

実車両を用いてインバータ動作時のアンテナ誘起電圧を測定した。

値と比較した。

4. 測定

構築した電磁ノイズ測定専用車両を図5に示す。本研究で対象とする駆動用インバータ以外の電子機器が発生する電磁ノイズが混入しないよう、ほかの電子機器は車両から取り外した。放射電磁ノイズ測定用アンテナの位置は、解析と同じルーフ上および車両前方とし、ノイズ測定器を用いてアンテナへの誘起電圧を測定した。測定は外乱電磁ノイズを遮断するため、すべてシールドルーム内で行った。

5. 解析結果と実測結果の比較と考察

2か所のアンテナ位置における誘起電圧の周波数特性について、解析結果と実測結果を比較した（図6参照）。ノイズのピーク周波数は、アンテナ位置がルーフ上の場合には約6 MHz、車両前方の場合には約7 MHzとなり、それぞれの周波数で実測との差は3 dBおよび7 dBであり、実測とよく一致した。10 MHz以上の高周波帯域における誤差要因としては、車両の簡素化などが考えられる。また、車両全体解析では、ノイズ源モデルの誤差と車両モデルの誤差が積算されるため、各モデルの精度検証が重要である。

6. おわりに

車載電子機器の電磁ノイズ対策を上流の設計段階で作り込むべく、車両全体電磁ノイズ解析技術を開発した。車載アンテナへのノイズ混入量子測について、180 dB以上の広ダイナミックレンジな車両解析を3段階に分けて行うことで個々の解析が取り扱うダイナミックレンジを小さくし、機器設計への活用の実用的な精度（±12 dB以内）を達成した。今後、電子機器の電磁ノイズ抑制設計への開発技術の適用を進めていく。

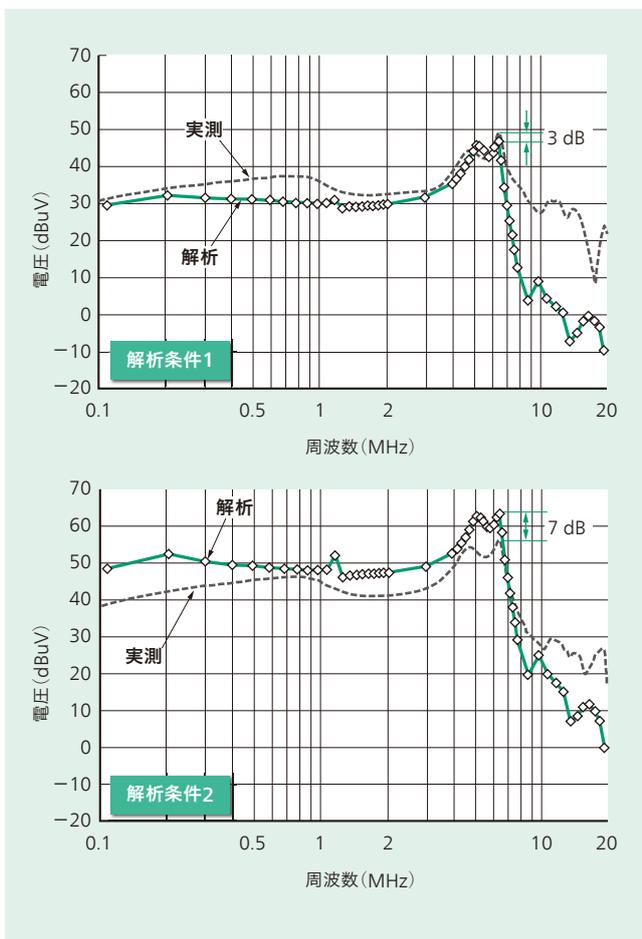


図6 放射電磁ノイズの解析結果と実測結果の比較

最大ノイズ量の解析結果は実測と比較して誤差約7 dBであり、アンテナ誘起電圧の周波数特性および位置による誘起電圧の違いを解析で確認できた。

謝辞

本研究はGeneral Motors Companyと共同で推進した。特にご尽力いただいたGMのWilliam Ivan氏、Andrew Baker氏をはじめとする関係各位に深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) T. Hubing: Component-Level Characterization for Vehicle-Level Electromagnetic Simulations, Proc. of the 2010 SAE Congress, no. 2010-01-0237, Detroit (2010.4)
- 2) C. Chen: Predicting vehicle-level EMC performance utilizing on-bench component characterization results, Proc. of the 1999 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Seattle, WA, USA, vol. 2, pp. 765-769 (1999.8)
- 3) H. Zeng, et al.: Vehicle-Level EMC Modeling for HEV/EV Applications, Proc. of the 2010 SAE Congress, no. 2015-01-0194, Detroit (2015.4)

執筆者紹介



船戸 裕樹
日立製作所 研究開発グループ 生産イノベーションセンタ
回路システム研究部 所属
現在、電子機器の電磁ノイズ設計技術の開発に従事
工学博士
IEEE学会会員、電子情報通信学会会員



李 ジャア
日立製作所 研究開発グループ 生産イノベーションセンタ
回路システム研究部 所属
現在、電子機器の電磁ノイズ設計技術の開発に従事
工学博士
電気学会会員



高橋 昌義
日立製作所 交通システム社 水戸交通システム本部
プロセス設計部 所属
現在、鉄道車両向け信号装置の開発に従事
工学博士
電子情報通信学会会員



Hua Zeng
Hitachi America, Ltd. Automotive Products Research Laboratory
所属
現在、電子機器の電磁ノイズ設計技術の開発に従事
工学博士
IEEE学会会員



方田 勲
Hitachi America, Ltd. Automotive Products Research Laboratory
所属
現在、電子機器の電磁ノイズ設計技術の開発に従事
IEEE学会会員、電子情報通信学会会員



坂本 英之
日立オートモティブシステムズ株式会社
パワートレイン&電子事業部 電子設計本部
情報安全システム設計部 所属
現在、車載情報安全機器の設計開発に従事
自動車技術会会員



齋藤 隆一
日立オートモティブシステムズ株式会社
パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 インバータ設計部 所属
現在、自動車用インバータの開発に従事
電気学会会員、自動車技術会会員