

— EVバッテリー高電圧化に伴う課題と新規試験法 —

リバブレーションチャンバ法の分析および 放射イミュニティ評価法との比較

株式会社デンソー EMC エンジニアリングサービス

車載機器計測精度分析ワーキンググループ 主査

貝山 光雄

車載機器計測精度分析ワーキンググループ(略称:車載WG)では、近年設備導入が進んでいる車載機器EMC評価用のリバブレーションチャンバ(RC)法(ISO 11452-11)の、ワーキングメンバー企業内で保有している試験設備の特性評価を行っている。その結果、RCのサイズやスターラー形状が異なっていてもストレス特性は類似することがわかった。本稿では、アンテナ照射法(ISO 11452-2)との比較結果ならびに、RCの電磁界解析との比較結果を報告する。

1. はじめに

車載機器計測精度分析WG(略称:車載WG)は、車載EMC計測に従事する日本国内メンバー(サプライヤ、部品メーカー、計測器メーカー、システムインテグレータ、EDAベンダ、EMC試験所他)から構成されており、試験所間相関(ILC:Inter-laboratory comparison)活動を中心に、試験法や計測器の精度分析を主に実施している。これまでの活動実績としては、2014年にプリアンプ飽和にともなうスペクトル歪の分析とその対処法を、2015年には間欠ノイズの計測手法分析および間欠ノイズ周期計測ソフトウェアの開発がある。その後、2016年～2018年には車載機器放射エミッション評価のILC計測および分析を、2019年からは車載機器放射イミュニティ評価分野にも範囲を広げ、現在も進行中である。

2. エミッション評価におけるILC活動

ILCとは、異なる試験所で同一サンプルを試験し、結果を比較することにより参加試験所の信頼性を評価することで、とりわけ試験繰り返し比率の高い車載EMC試験所にとって重要な活動の一つである。車載機器のエミッション評価方法と限度値を規定した国際規格CISPR 25^[1]に暗室妥当性評価およびILCに関する項目(Annex J)が追加されたことに伴い、ロングワイヤアンテナ(LWA)を同一測

定対象とした暗室間相関評価を車載WGメンバー内の試験設備で実施した。図1に、アクティブロッドアンテナを使用した150kHz～30MHzの帯域の結果を示す。

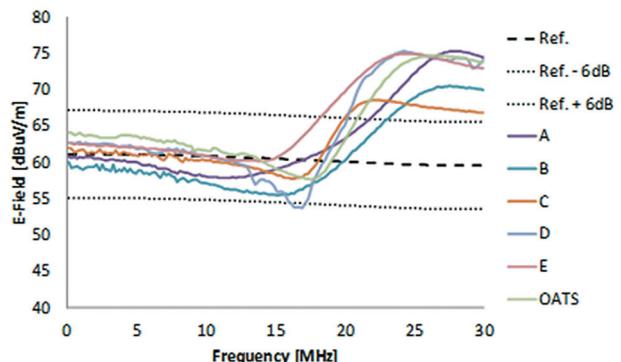


図1 エミッションILC結果(150kHz～30MHz)

図1に示すようにすべての試験所で国際規格に規定されているリファレンス値の±6dBを逸脱する結果となった。そこで、このリファレンス値を導出するためのシミュレーションモデルが実際の測定セットアップと異なることから、あえてオープンエリアテストサイト(OATS)にて同一セットアップでの測定を実施したところ、その結果が規格のリファレンス値に近くなることが確認できたため、図1に示したように、リファレンス値の許容値に収まらない理由が各試験所の実測定環境と異なることが原因であることを実証した。この結果から、LWA法における測定

系の改良方法やアンテナケーブルの配策に関する課題等について分析をすすめ、それらの結果について国際学会等で発表を行った。(3件)^{[2][3][4]}

3. イミュニティ評価におけるILC活動

前項での報告のとおり、車載部品機器のエミッション測定規格では、LWA法を用いた暗室間相関や妥当性の評価方法に基づいた分析を進めてきたが、一方、イミュニティ試験法の国際規格であるISO 11452シリーズには、暗室間相関や妥当性の評価法が規定されていない課題がある。そこで本WGでは、従来規格として利用されているISO 11452-2^[5]に規定されているALSE法に準拠しDUT(Device Under Test)とその負荷シミュレータ、ならびにそれらを接続するワイヤーハーネスを模擬する治具を考案した。この治具はLWAをベースに、ISO 11452-2準拠とするためにアンテナエレメント長を1700mmとし、エレメント両端から100mmの位置で90度ペントした。当WGではこのアンテナを、エレメントを延長したLWAであることから、ロングロングワイヤアンテナ(LLWA)と命名(図2)し、このLLWAを用いたイミュニティ試験の妥当性確認をWG間でラウンドロビンテスト(RRT)を実施し、相関評価を行った。

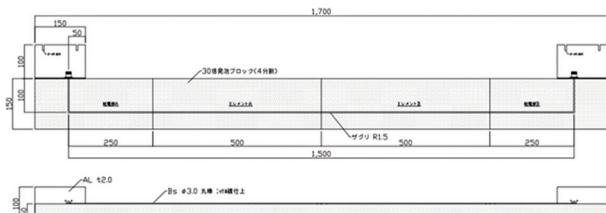


図2 ロングロングワイヤアンテナ(LLWA)

RRTにおける相関評価の測定順序は以下のとおり。

■ 手順1: 基準電界校正

ISO 11452-2に準拠した点(※)における基準電界照射時の進行波電力の大きさ(P_{fwd})を計測し記録する。

※ グランドプレーンから150mmの高さ(ビーム中心より上方50mm、エッジより100mm地点)

■ 手順2: アンテナ間結合度測定

ネットワークアナライザを用いてアンテナ間の結合係数(S_{21})を計測する。ポート1は電界照射アンテナに、ポート2はLLWA端、LLWAのもう片端に50Ω終端を接続し、フル2ポート計測を行い、タッチストーン形式にてデータを記録する。(図3参照)

ト2はLLWA端、LLWAのもう片端に50Ω終端を接続し、フル2ポート計測を行い、タッチストーン形式にてデータを記録する。(図3参照)

■ 手順3: ポスト処理(DUT端印加電圧)

先の2つの測定結果を用い、基準電界照射時におけるDUT端電圧 P_{dut} は、以下の式で算出する。

$$P_{dut} = P_{fwd} + S_{21}$$

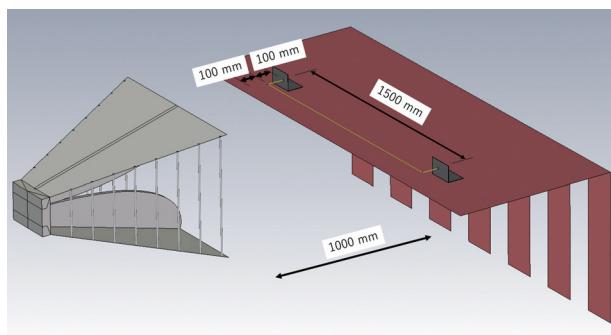


図3 アンテナ間結合度測定

先の手順1から3に従い、基準電界強度を100V/mとしたときのDUT端電圧の測定結果について図4に示す。

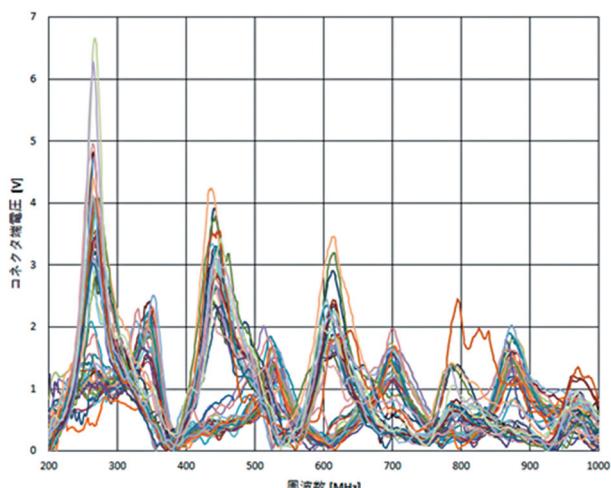


図4 DUT端出力電圧

上記結果のうち、多数を占めるETS-Lindgren製3106Cと同じ開口面積のダブルリッジガイドアンテナによるシミュレーション解析結果を比較(図5)したところ、よく一致することがわかる。

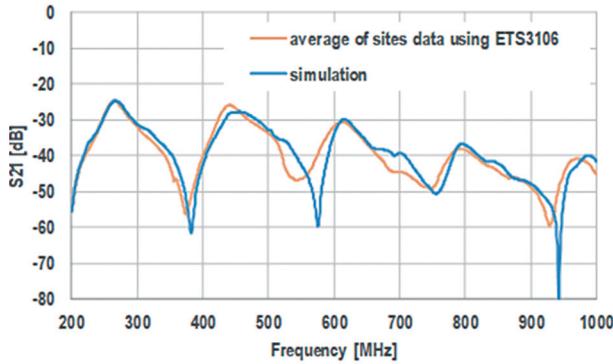


図5 シミュレーション結果と実測結果の比較

このように、車載機器の放射イミュニティ評価のサイト妥当性を評価する方法としてLLWA法を提案し、20のサイトの計26の電波暗室で、RRT評価を実施した。その結果、電界照射用アンテナの種類がサイト間相関を決める要因であること、照射時のDUT端電圧に鋭い周波数特性が存在すること、また、アンテナ種類を定めることでリファレンス値をシミュレーション解析により算出可能であることがわかった。このようなILC活動の結論として、アンテナの種類を決めることで高い相関が出ることを確認した。

ただし、試験系が持つ周波数特性については、規格毎の分析が必要であるため、ここ近年、WGメンバー内の試験設備で導入が始まっているリバブレーションチャンバ(RC)法についても分析を行うこととなった。

ALSE法とRC法のアンテナとLLWA間の結合係数(S_{21})の評価比較を図6に示す。ただし、この評価においてRCは連続回転動作であり、測定値は計測器のマックスホールド機能を用いて複数掃引時の最大値を記録したものでISO 11452-11^[6]に準拠した計測法ではない。サイトA、BのRC法とALSE法の200～1000MHzの比較では、ALSE法でみられるLLWAの共振に伴う周波数特性の変動が、RC法では小さく観測されている。前述の様に図6の計測は規格に準拠したものではないため、RCにおける規格準拠計測時のDUT端電圧評価をRRTにて改めて実施することにした。

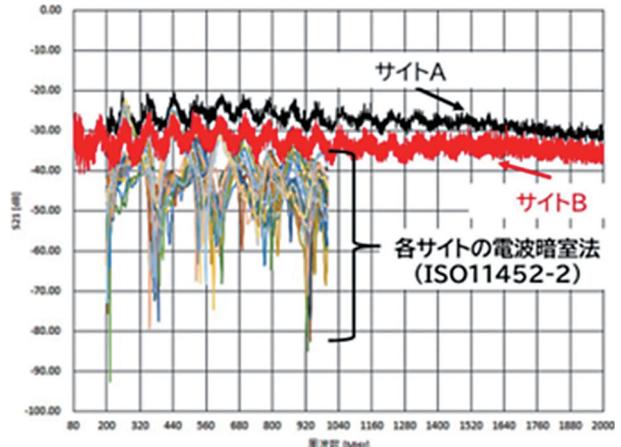


図6 ALSE法とRC法の結合係数比較

4. リバブレーションチャンバ(RC)評価

RC評価については、以下の項目について実施した。

- ① チャンバゲインについて
- ② ローディングファクタについて
- ③ 100V/m照射時のDUT端電圧について

4.1 チャンバゲイン

G_{RC} の導出方法は文献7^[7]より以下の式による。

$$G_{RC} = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^N (E_{Xi} + E_{Yi} + E_{Zi})$$

$$E_{Xi} = \frac{e_{Xi, max}}{\sqrt{P_{Forw, avg}}}$$

ここで、

i :電界プローブのポジション位置(x, y, z)

$P_{Forw, avg}$:スタートラ1回転の平均進行波電力

E_{Xi} :各ポイントX軸における正規化最大電界強度

$e_{Xi, max}$:各ポイントのX軸の電界強度の最大値

今回、3か所のサイトでデータを取得した。それらのデータに基づき算出した G_{RC} を図7～9に示す。

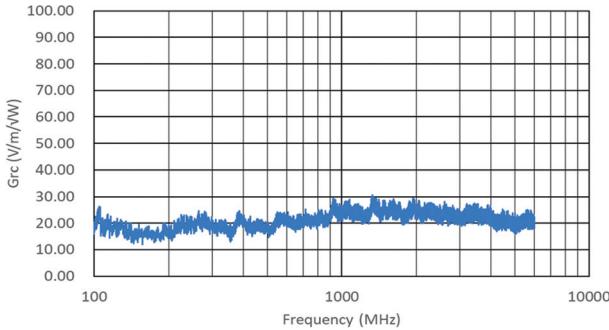


図7 サイトAの G_{RC}

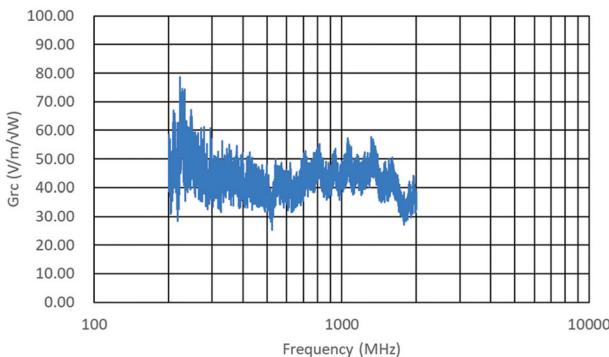


図8 サイトBの G_{RC}

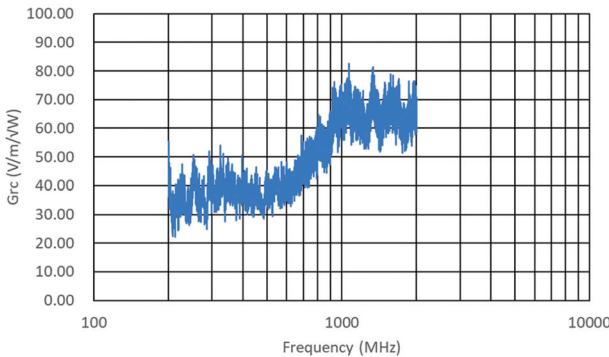


図9 サイトCの G_{RC}

このように、各サイトの G_{RC} に違いが生じていることについて考察をした。文献^{[7][8]}によるとチャンバゲインにおけるQの要因は以下の4つである。

Q_1 : 壁での損失

Q_2 : チャンバ内の負荷

Q_3 : 開口部の漏れ

Q_4 : 受信アンテナの負荷

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} + \frac{1}{Q_3} + \frac{M}{Q_4}$$

(M:チャンバ内のアンテナの本数)

Q_2 と Q_3 の影響は無いものとして、 Q_1 、 Q_4 のみを考えると、

$$Q_1 = \frac{3V}{2\mu_r \delta A} = \frac{3V \sqrt{\omega \mu_0 \sigma_w}}{4A} = \frac{3V \sqrt{2\pi f \mu_0 \sigma_w}}{4A}$$

$$Q_4 = \frac{16\pi^2 V}{m\lambda^3} = \frac{16\pi^2 V f^3}{mc^3}$$

ここで μ_w 、 σ_w は壁の比透磁率と比導電率であり、 $\mu_w \approx 1$

また、Aは壁の面積、Vはチャンバの体積で、mはアンテナミスマッチ、ηはアンテナ効率である。

VとQの要因を加味し正規化すると各サイトの G_{RC} はかなり近づき、理論通りの振舞いをしていると考える。

4.2 ローディングファクタ

このファクタは、試験品やテストベンチをワーキングボリューム(図10)内に配置することによって電界強度が低下するため、RCへ入力する電力の補正係数である。事前検証にて取得するワーキングボリューム内が空の状態での送受信電力(8ポイント)の比の平均を($A_{ACF,empty}$)、試験開始前に取得するDUTセットアップ後の送受信電力の平均を(A_{CCF})と定義すると、ローディングファクタ(F_{CLF})は以下の式で導出される。

$$F_{CLF} = \frac{A_{ACF,empty}}{A_{CCF}}$$

この式から、 F_{CLF} は負荷がある時と負荷が無い時の比率を示していると言える。

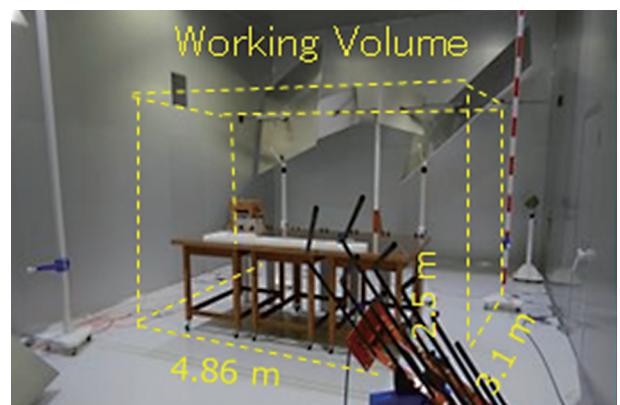


図10 ワーキングボリューム

車載部品評価では電流経路としてグラウンドプレーン(GP)が必要なため、サイトAにおいてGP上にLLWAを配置し測定した。その際のデータおよび、発泡スチロール製の机の上にLLWAを配置し測定したデータを図11に示す。

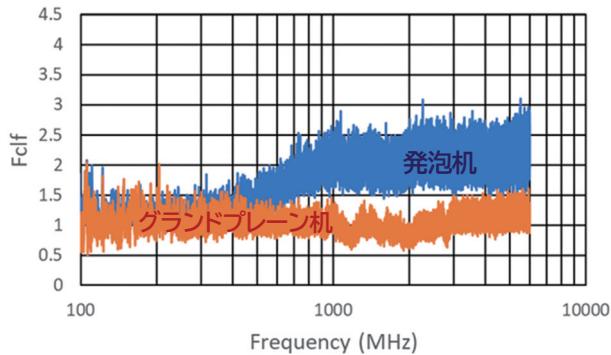


図11 発泡机とGP机によるローディングファクタの違い

この結果より、400MHz以上で発泡机の強い影響がみられ、ファクタ値が1.5～3(同一照射電力なら電界強度として20～40%に相当)となっていることがわかる。これは、発泡机によりチャンバ内のエネルギーが吸収されていると考えられる。また、グランドプレーン机による条件では全帯域でファクタが1に近く、チャンバの負荷としては発泡スチロールより影響が小さい。車載部品評価試験ではリターン電流経路としてGPが必要なため、影響が大きいGPの有無についてはテストプラン等で指示するなどの検討が必要である。

4.3 LLWA法によるDUT端電圧

RCのスターラーを30度回転毎に12ステップさせて取得したデータを基に、基準電界強度(100V/m)照射時相当のLLWA端出力電圧を算出した。取得データについては、特性を見やすくするために移動平均処理を施した。そのグラフを図12に示す。サイト間および、机の構造(発泡スチロール or GP)に依らず、出力電圧は近い値となっているため、サイトの設備が異なっていても、DUTにかかるストレスの大きさの差は小さいと考えられる。

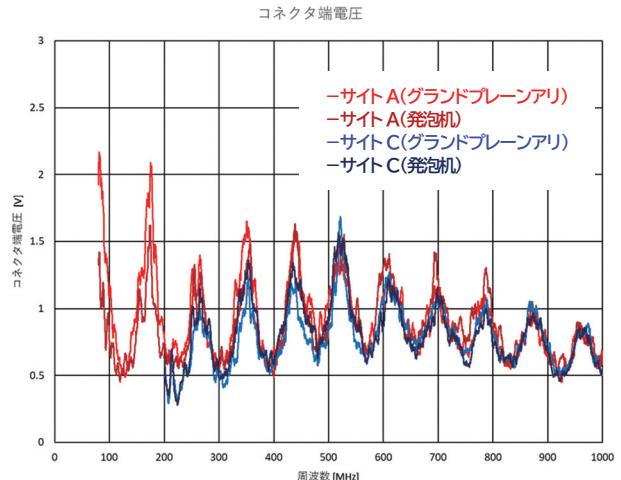


図12 発泡机とGP机によるDUT端出力電圧の違い

4.4 まとめ

計3か所のサイトで、保有するチャンバサイズやメーカーの異なるRCに対してRRTを実施、評価してきた結果を以下にまとめる。

● チャンバゲイン

試験室寸法が大きい場合、小さくなる傾向を確認したが、一部不明点が残っているため分析を継続する。

● ローディングファクタ

発泡台の影響(エネルギーの吸収)を確認したが、この現象は受信アンテナによるエネルギー吸収量に左右されるもので、DUTへの印加ストレスはローディングファクタ補正により、ほぼ同一のストレス印加が可能と考える。

● LLWA端電圧

異なるメーカー やサイトであっても、帯域幅があるイミュニティ評価であれば近い実効電力が印加できる。CWの場合は、高Qな測定系由来の再現性課題が懸念される。

● ALSE法との比較

ALSE法の水平／垂直偏波でLLWAに照射される状態を、RC法では一度に照射できること、ALSE法で確認したストレスのかからない周波数(ヌル点)においてもストレス印加が出来ることを確認できた。また、実評価にあたり、高Q値がもたらす弊害(再現性の乏しさ、周波数特性のピーク一さ)については、他の評価方法を含めた継続的な比較分析が必要である。

5. おわりに

実験の実施にあたり、多くの方々や関係機関のご協力を賜ったことに感謝いたします。また、RRT評価の度に、光電界センサー式を貸与して頂いた株式会社精工技研殿のご協力に心より感謝いたします。



貝山 光雄(かいやま みつお)

参考文献

- [1] CISPR 25:Edition 5.0 2021-12.
- [2] 鵜生、前田、田中、奥田、和田：“車載機器用EMC試験サイトの相関評価～CISPR25 Annex Jリファレンスデータの妥当性検証～”，信学技報、EMCJ 2017-86.
- [3] T.Uno, et al., “A study on characteristics of 10 MHz to 30 MHz in CISPR 25 ALSE method:CISPR 25 Annex J reference data verification of long-wire method,” 2018 IEEE Int. Sympo., pp. 584–589.
- [4] T.Uno, et al., “Quantitative Interlaboratory Comparison of Radiated Immunity Test for On-board Equipment,” 2021 APEMC, 2021, pp. 1–4.
- [5] ISO 11452-2:Edition 3.0 2019-01.
- [6] ISO 11452-11:Edition 1.0, 2010-09.
- [7] HILL, DA., Electromagnetic theory of reverberation chambers, National Institute of Standards and Technology (US) Technical Note 1506, Dec. 1998.
- [8] A.Cozza, “Power Loss in Reverberation Chambers by Antennas and Receivers”, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 60, no. 6, pp. 2041–2044, Dec. 2018.

1988年 工学院大学 工学部 電子工学科 卒業
2003年 株式会社アイピーエス 入社
2017年 株式会社アイピーエス東海 転籍
2021年 ビューローベリタスジャパン株式会社 転籍
2022年 株式会社デンソー EMCエンジニアリングサービス 入社
現在、試験所の技術管理業務に従事

iNARTE認定EMCエンジニア
第1級陸上無線技術士