

試験周波数の拡大が求められる自動車 EMC

総合製品安全部門 計画室

塚原 仁

tsukahara-hitoshi@jqa.jp

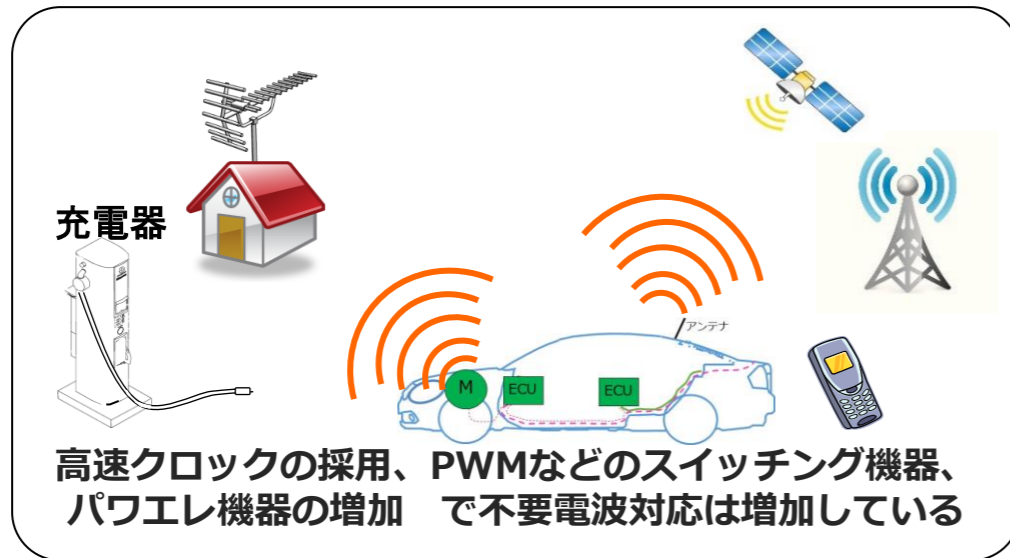
2024年5月16日

本日のアジェンダ

1. 自動車EMCと試験規格
2. 周波数の拡大と高周波帯での試験品質
3. リバブレーションチャンバーの要件とイミュニティ試験
4. リバブレーションチャンバーの放射エミッション測定への適用
5. まとめ

自動車のEMC環境と試験法

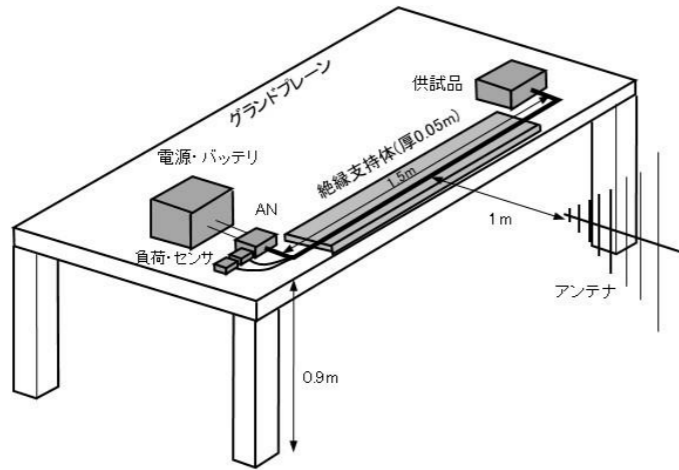
- 電波利用がますます促進される社会の中で、自動車は**移動中**にいろいろな電波に遭遇している
- 最近の自動車は、環境・安全・快適のより一層の実現のため、**高度に電子化**されてきている
- 自動車のEMCについては、**法規制**を満足することが求められています



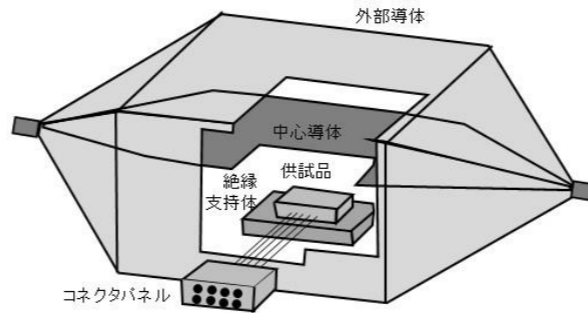
自動車と自動車部品に関するEMC国際規格(CISPRとISO)

		試験	国際規格	印加点/測定点	試験周波数
実車試験	EMI	広帯域雑音測定	CISPR12	10mか3mの距離で電界測定	30MHz~1GHz
		狭帯域雑音測定		10mか3mの距離で電界測定	30MHz~1GHz
		車載受信機保護	CISPR25	自車アンテナの電圧測定	150kHz~2.5GHz
		低周波放射妨害	CISPR36	3mの距離で磁界測定	150kHz~30MHz
	EMS	実車試験一般	ISO11451-1	—	—
		車外放射源法	ISO11451-2	車両に外部から印加	10kHz~18GHz
		可搬型送信機法	ISO11451-3	可搬型送信機により印加	1.8MHz~5.85GHz
		BCI法	ISO11451-4	ハーネスに印加	1MHz~400MHz
		リバブレーションチャンバー法	ISO11451-5	ハーネス/ECUに印加	LUF (又は10kHz)~18GHz
		静電気放電試験	ISO10605	人が接触可能部位に印加	—
部品試験	EMI	車載受信機保護	CISPR25	1mの距離で電界測定 伝導エミッション測定	150kHz~2.5GHz
		部品試験一般	ISO11452-1	—	—
	EMS	電波暗室法(ALSE)	ISO11452-2	ハーネス/ECUに印加	80MHz~18GHz
		TEMセル法	ISO11452-3	ハーネス/ECUに印加	10kHz~200MHz
		BCI法/TWC法	ISO11452-4	ハーネスに印加	1MHz~3GHz
		ストリップライン法	ISO11452-5	ハーネス(とECU)に印加	10kHz~400MHz
		直接電力注入法(DPI)	ISO11452-7	コネクタピンに印加	250kHz~400MHz
		低周波磁界	ISO11452-8	ECUに印加	15Hz~150kHz
		可搬型送信機	ISO11452-9	ハーネス/ECUに印加	26MHz~5.85GHz
		低周波伝導	ISO11452-10	ハーネスに印加	0Hz、15Hz~150kHz
		リバブレーションチャンバー法	ISO11452-11	ハーネス/ECUに印加	LUF~18GHz
		静電気放電試験	ISO10605	ハーネス/ECUに印加	—
	過渡電圧	試験一般	ISO7637-1	—	—
		伝導	ISO7637-2	電源線にパルス印加/測定	—
		結合	ISO7637-3	電源線以外の線に印加	—
		高電圧部品用	ISO/TS7637-4	高電圧線に印加	—
		試験器の検証法	ISO/TR7637-5	—	—

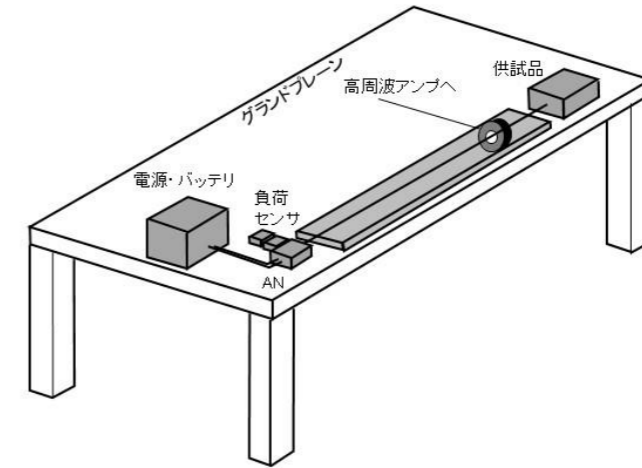
ISO11452 車載機器のRFイミュニティ試験



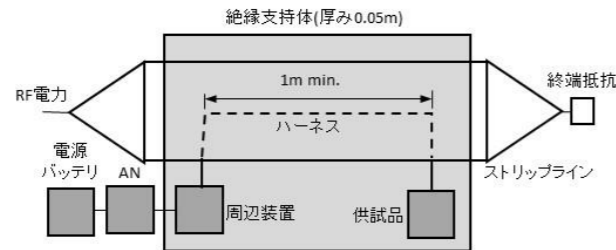
ISO11452-2 ALSE法



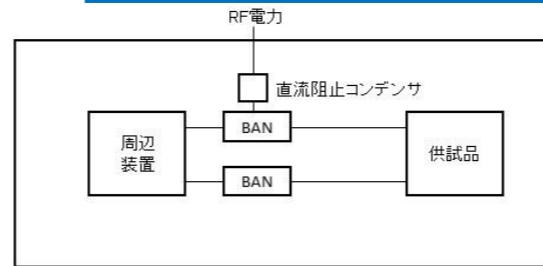
ISO11452-3 TEMセル法



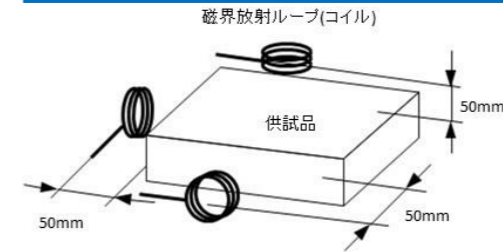
ISO11452-4 BCI法+TWC法



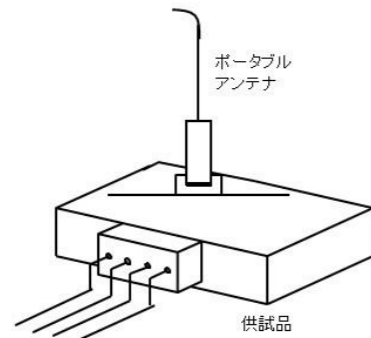
ISO11452-5 ストリップライン法



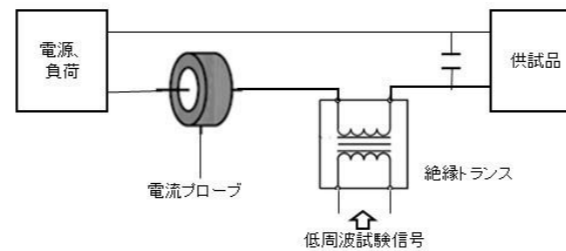
ISO11452-7 BAN法



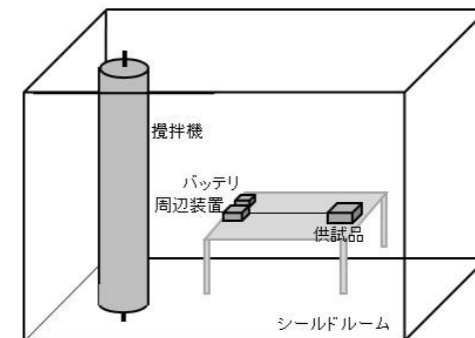
ISO11452-8 低周波磁界試験法



ISO11452-9 可搬型送信機法



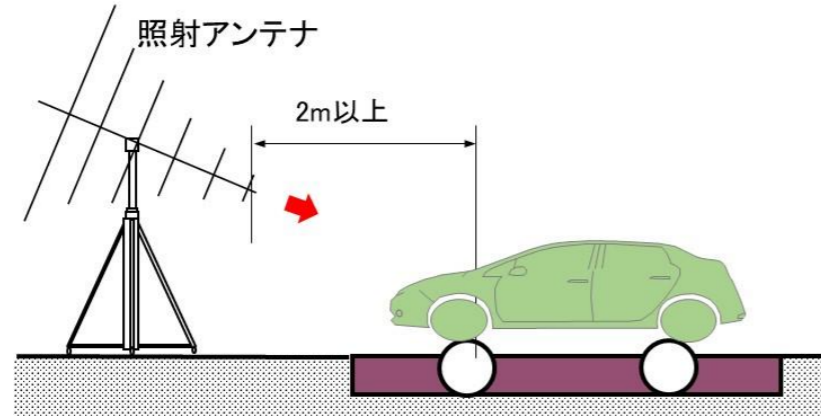
ISO11452-10 伝導電流試験法



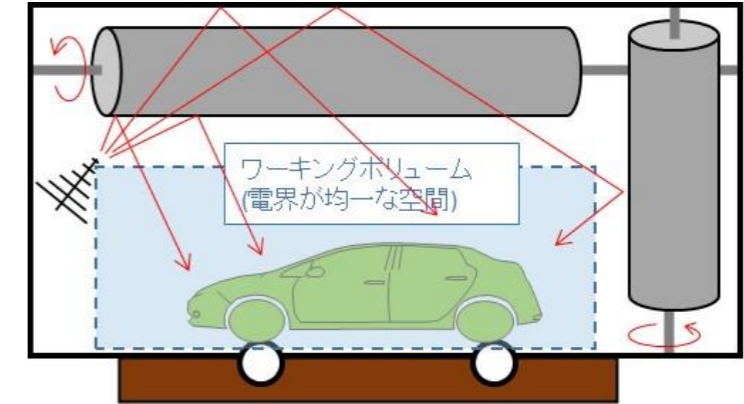
ISO11452-11 リバレーションチャンバー法

先進的な自動車を念頭に試験品質の議論が進む . . . 照射方向

- R10-07改定版の作業の中で、早い時期からイミュニティ試験の後方照射や横方向照射の必要性の議論が出てきていた
- ほぼ同じ時期に、実車リバブレーション法のISO11451-5の標準化作業が開始され、2023年に発行された

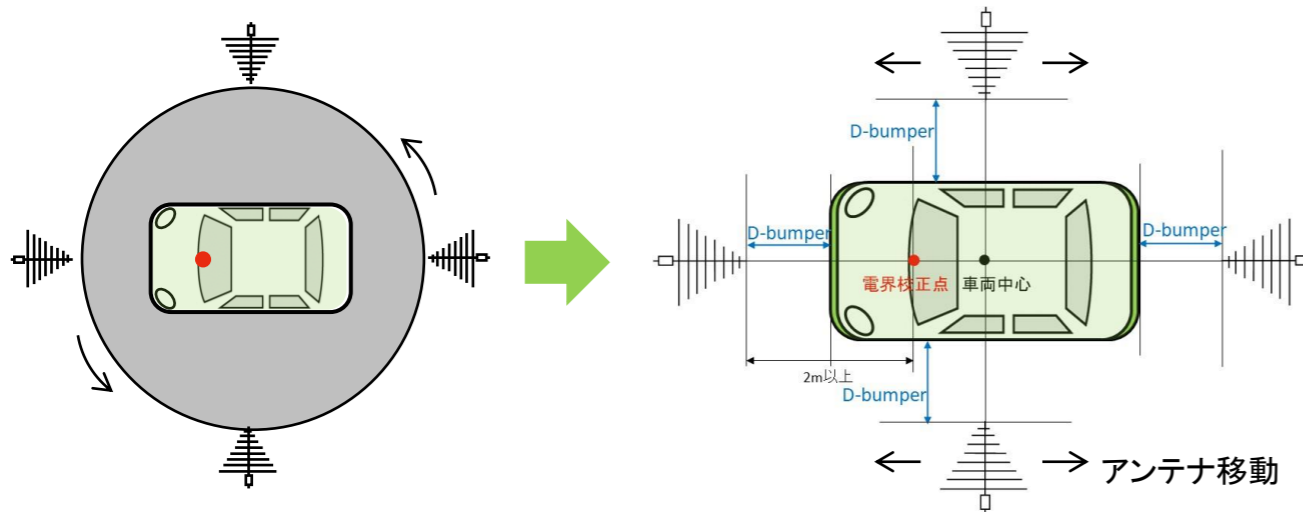


ISO 11451-2 ALSE法(前方照射の場合)



ISO 11451-5 リバブレーションチャンバ法

2023.5 初版発行



ISO 11451-2 ALSE法

前方照射、後方照射、側方照射の場合の電界基準点とアンテナ距離

本日のアジェンダ

1. 自動車EMCと試験規格
2. 周波数の拡大と高周波帯での試験品質
3. リバブレーションチャンバーの要件とイミュニティ試験
4. リバブレーションチャンバーの放射エミッション測定への適用
5. まとめ

EMC試験法の試験周波数の拡大

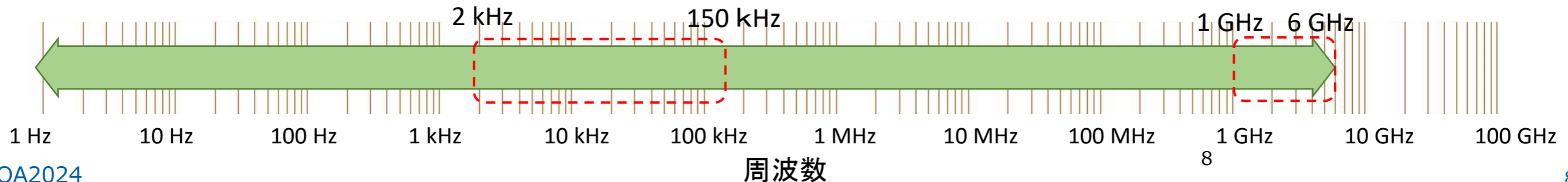
高周波

- イミュニティ試験の周波数が拡張される
 - ・ 自動車EMC法規R10-07は、6GHzまで拡張される予定
 - ・ ISO規格は、実車試験も車載機器もすでに6GHzをカバーしているが試験品質の確保のために試験時間が増加
 - ・ 実際にすでに試験を実施している企業は増えてきている

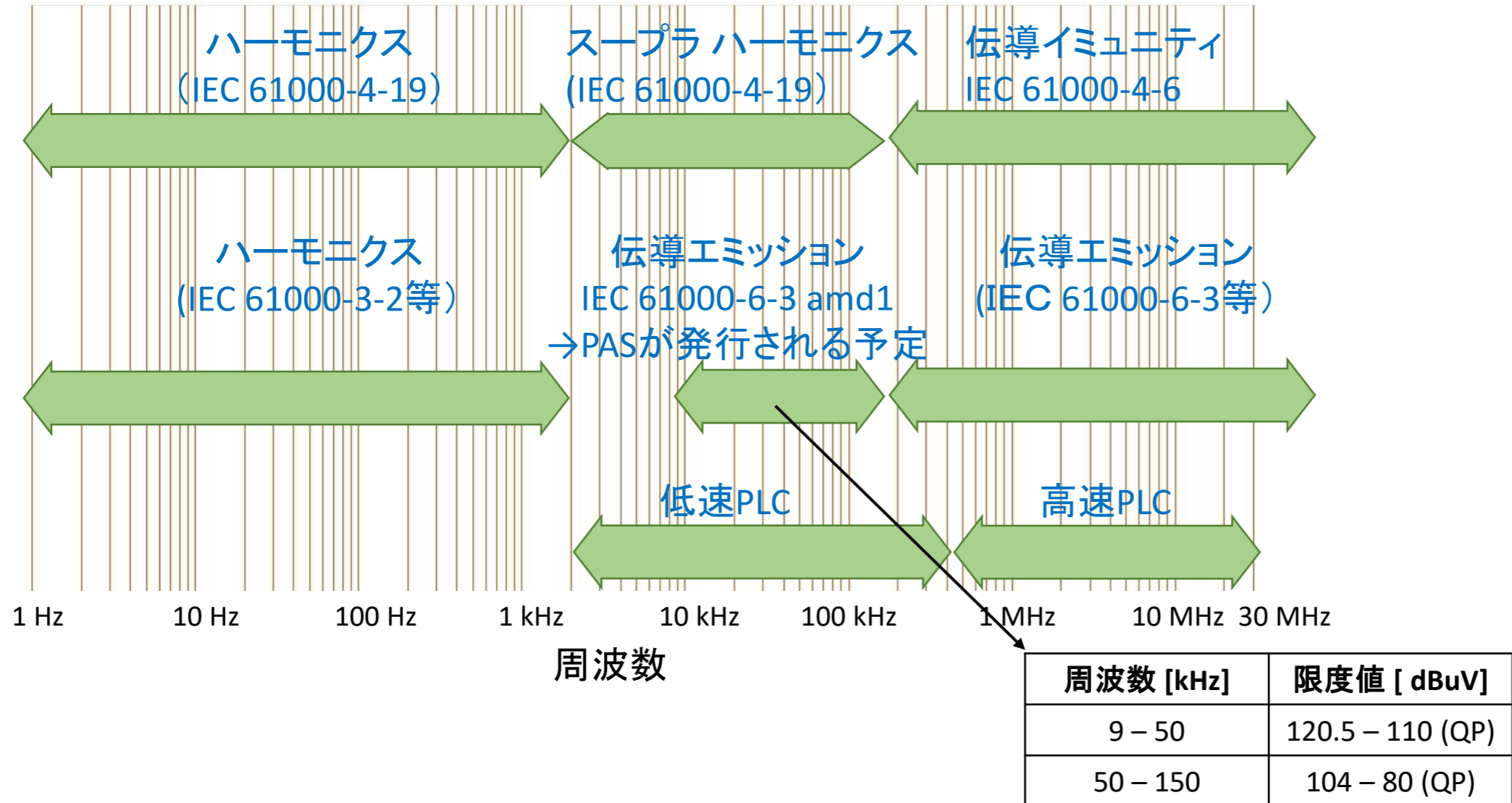
- エミッション試験の周波数が拡張される
 - ・ 実車のCISPR12ではまだ1GHzまでだが、他の製品委員会同様、6GHzまで拡張する議論が始まった
 - ・ 車載機器のCISPR25は車載受信機保護の目的で6GHzまで規定しているが、課題は試験品質が維持できるかである（EUTの放射・受信パターンのビーム割れ等）

低高周波

- 低い周波数への拡張も徐々に規定されていく可能性がある
 - ・ 9 kHz – 150 kHzのEMC要件が追加される可能性がある
（電力変換装置等によるスープラハーモニクスとAC電源ポートの伝導エミッション）
 - ・ WPTで電界を測定する必要性を求められている。特に、5MHz以下では必要になるがどうかは焦点
 - ・ EV充電モードは、部品試験でも磁界を測定すれば問題ないか



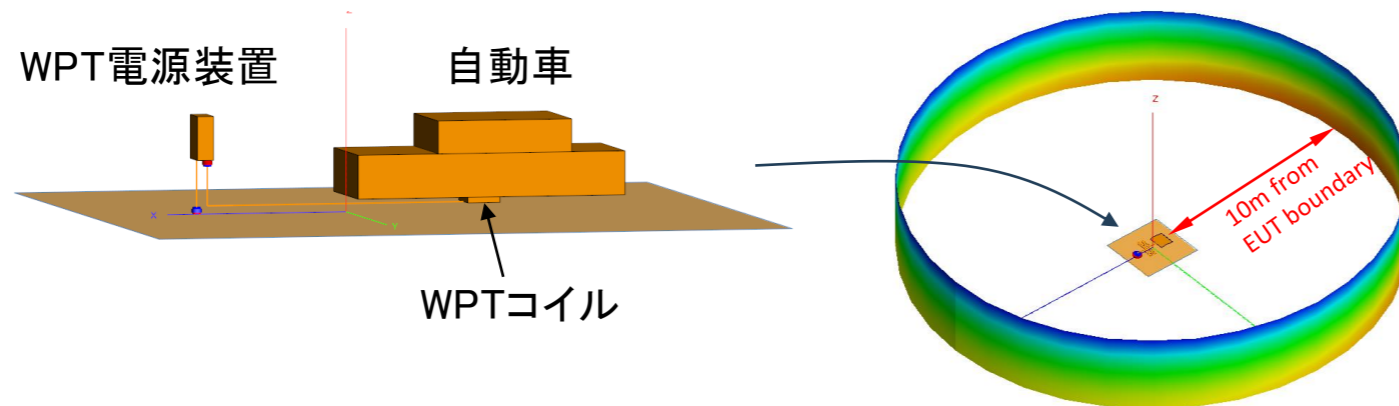
- AC電源ポートのEMC要件が規定される。特に、9kHz – 150kHzの伝導エミッションは厳しいものと思われる



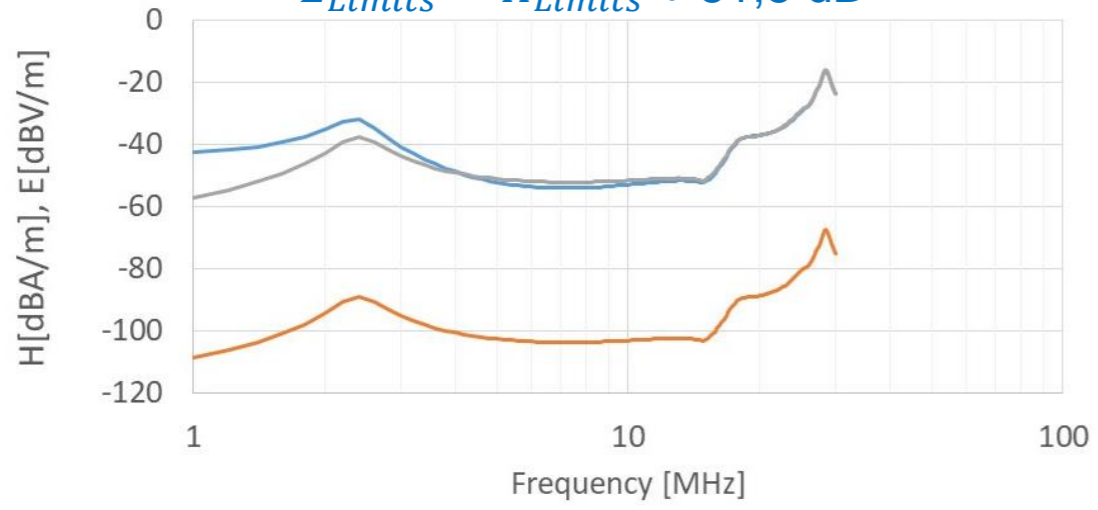
AC充電ポートの伝導エミッション限度値

CISPR11でのワイヤレス充電 電界限度値規定 9kHz~30MHz

- CISPR11において、10m距離でのモノポールアンテナ測定が議論されている
- 低周波での電界測定が求められることになるか？
 - 磁界測定でほぼカバーできるのではないか
 - AC電源ポートの伝導エミッション測定でカバーできるのではないか



$$E_{Limits} = H_{Limits} + 51,5 \text{ dB}$$



Translated English of Chinese Standard: GB/T18387-2017
www.ChineseStandard.net
Sales@ChineseStandard.net

GB

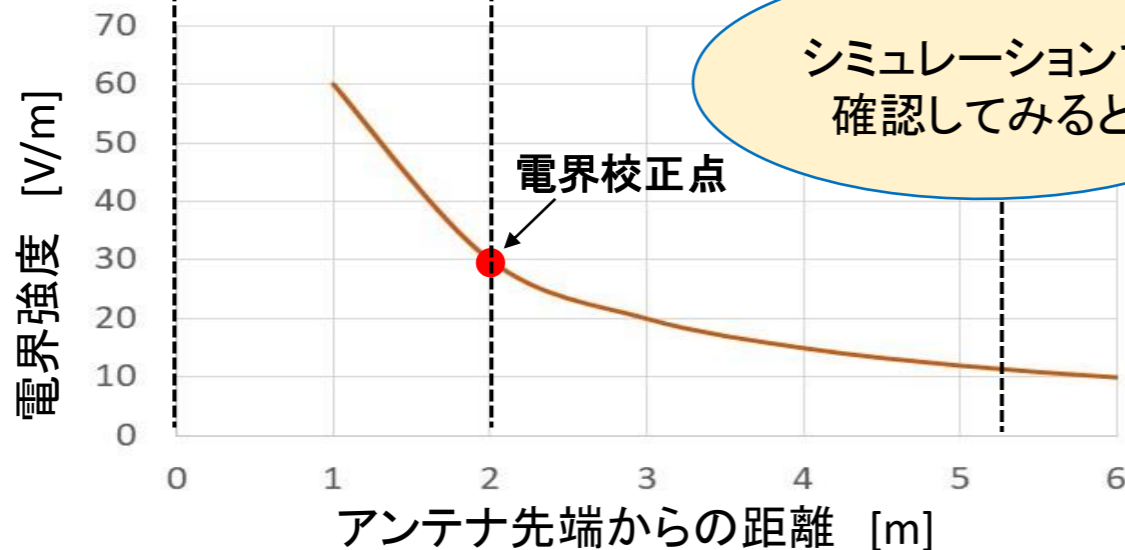
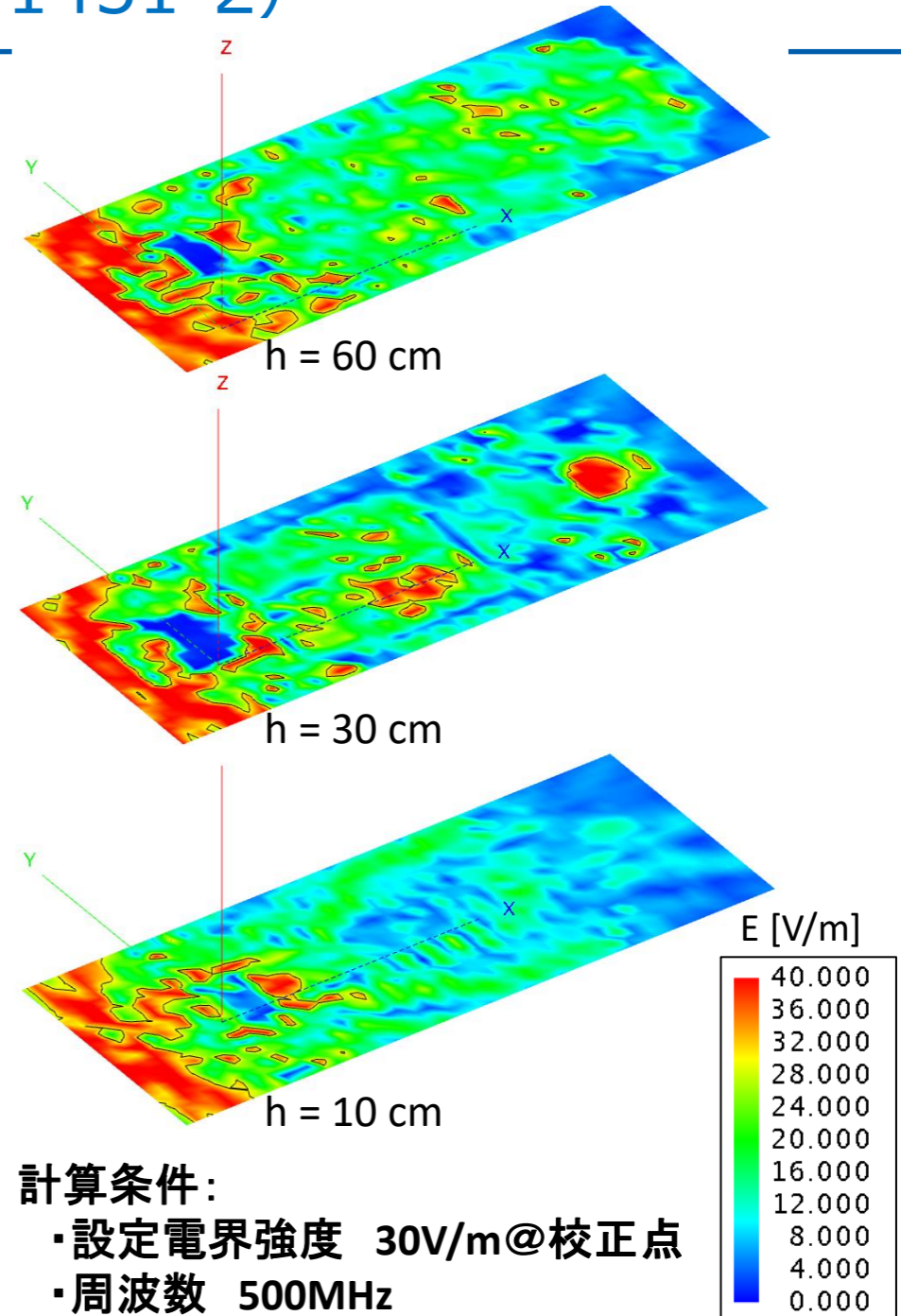
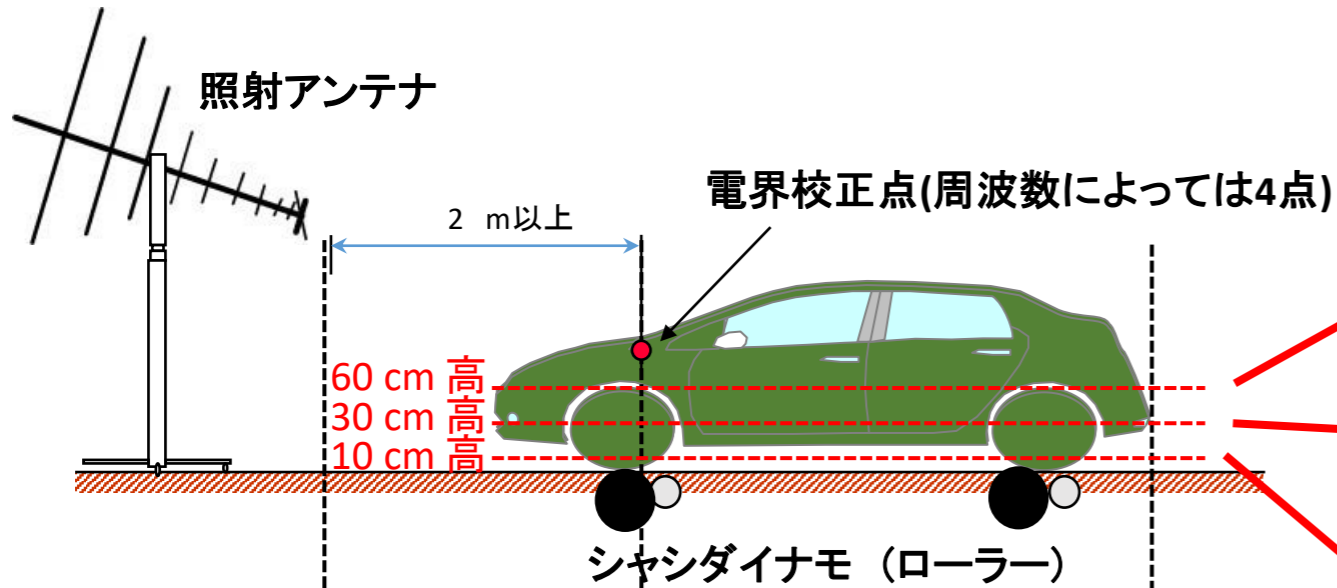
NATIONAL STANDARD OF
 THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

GB/T 18387-2017
 Replacing GB/T 18387-2008

Limits and test method of magnetic and electric field strength from electric vehicles
 电动车辆的电磁场发射强度的限值和测量方法

電界測定を規定している中国GB/T規格

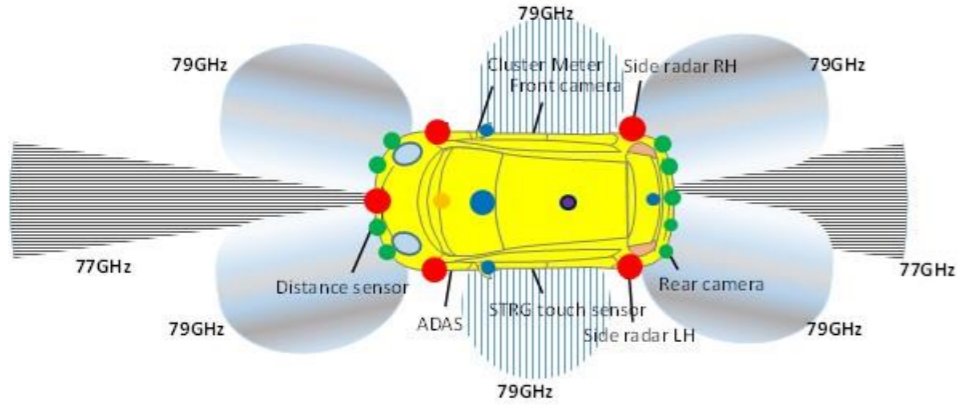
実車イミュニティ試験法の振り返り (ISO 11451-2)



シミュレーションで確認してみると

- 計算条件:
- ・設定電界強度 30V/m@校正点
 - ・周波数 500MHz

次世代の自動車



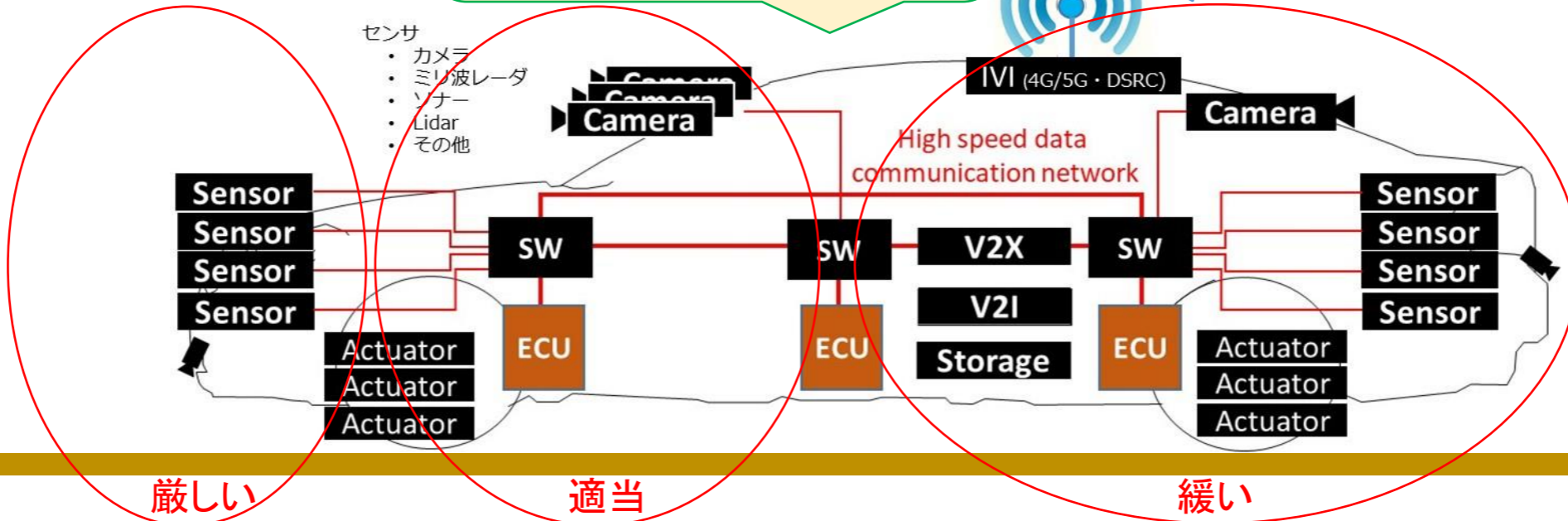
■ 車体周囲に取り付けられたセンサで周囲360度を監視する

■ 自動車内では高速通信ネットワークが構築され大量のデータが処理される(画像や高精度地図など)

■ インフラと無線通信でつながる
(ソフトウェアのアップデートなど)



車両正面からの照射の試験では

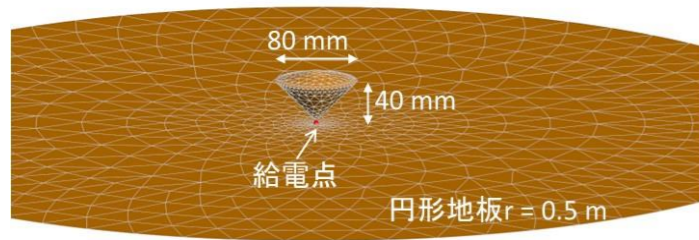


厳しい

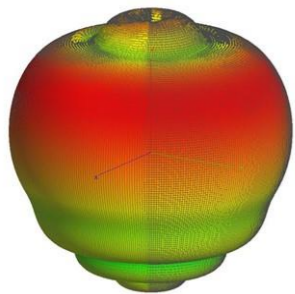
適当

緩い

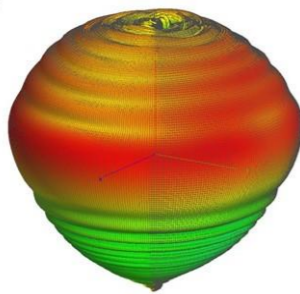
自動車におけるGHz帯での放射エミッションの様子(遠方界)



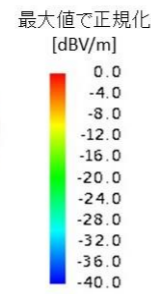
円錐形のアンテナ



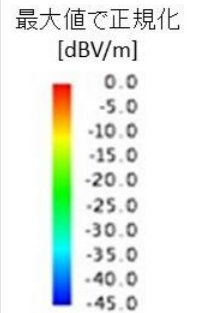
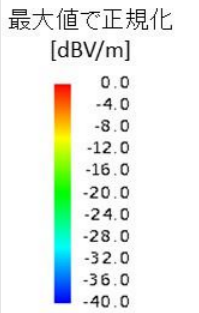
指向性@1GHz



指向性@5GHz



	1GHz	5GHz
放射特性		
アジマスパターン		



大地: CCIR-D ($\epsilon_r = 15, \sigma = 0.001 \text{ S/m}$)

アンテナ単体では

車載用5Gアンテナを室内に装着すると

CISPR25ロングワイヤの放射エミッションの様子(遠方界)

- 配置1 : GP上にCISPR 25規定の通常の配置
- 配置2 : GP上に90度回転させて配置
- 配置3: 空中に配置

(最大値で正規化して表示)

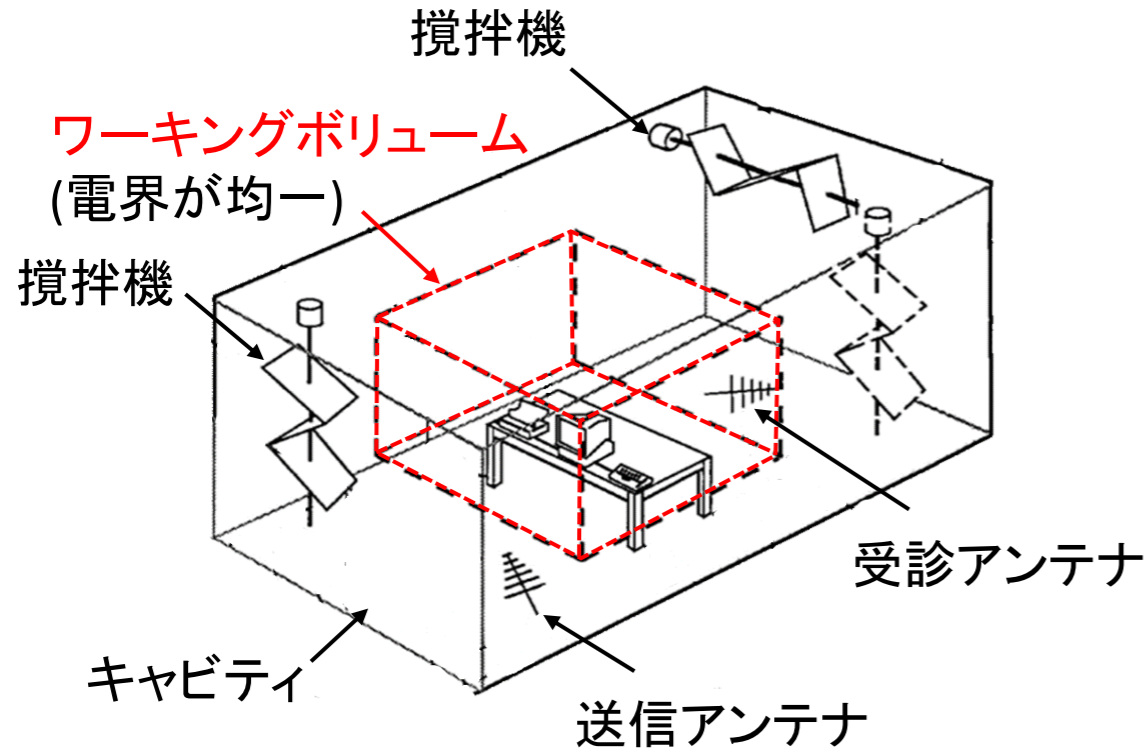
	Calculation model	Radiation pattern (E total)		
		500 MHz	1 GHz	6 GHz
配置1 CISPR 25規定 の通常の配置	<p>給電点[1V] 50Ω</p>	<p>Total E-Field Magnitude [dBV] 0.0, -4.0, -8.0, -12.0, -16.0, -20.0, -24.0, -28.0, -32.0, -36.0, -40.0</p>	<p>Total E-Field Magnitude [dBV] 0.0, -4.0, -8.0, -12.0, -16.0, -20.0, -24.0, -28.0, -32.0, -36.0, -40.0</p>	<p>Total E-Field Magnitude [dBV] 0.0, -4.0, -8.0, -12.0, -16.0, -20.0, -24.0, -28.0, -32.0, -36.0, -40.0</p>
配置2 90度回転させて 配置	<p>給電点[1V] 50Ω</p>	<p>Total E-Field Magnitude [dBV] 0.0, -4.0, -8.0, -12.0, -16.0, -20.0, -24.0, -28.0, -32.0, -36.0, -40.0</p>	<p>Total E-Field Magnitude [dBV] 0.0, -4.0, -8.0, -12.0, -16.0, -20.0, -24.0, -28.0, -32.0, -36.0, -40.0</p>	<p>Total E-Field Magnitude [dBV] 0.0, -4.0, -8.0, -12.0, -16.0, -20.0, -24.0, -28.0, -32.0, -36.0, -40.0</p>
配置2 空中に配置	<p>給電点[1V]</p>	<p>Total E-Field Magnitude [dBV] 0.0, -4.0, -8.0, -12.0, -16.0, -20.0, -24.0, -28.0, -32.0, -36.0, -40.0</p>	<p>Total E-Field Magnitude [dBV] 0.0, -4.0, -8.0, -12.0, -16.0, -20.0, -24.0, -28.0, -32.0, -36.0, -40.0</p>	<p>Total E-Field Magnitude [dBV] 0.0, -4.0, -8.0, -12.0, -16.0, -20.0, -24.0, -28.0, -32.0, -36.0, -40.0</p>

本日のアジェンダ

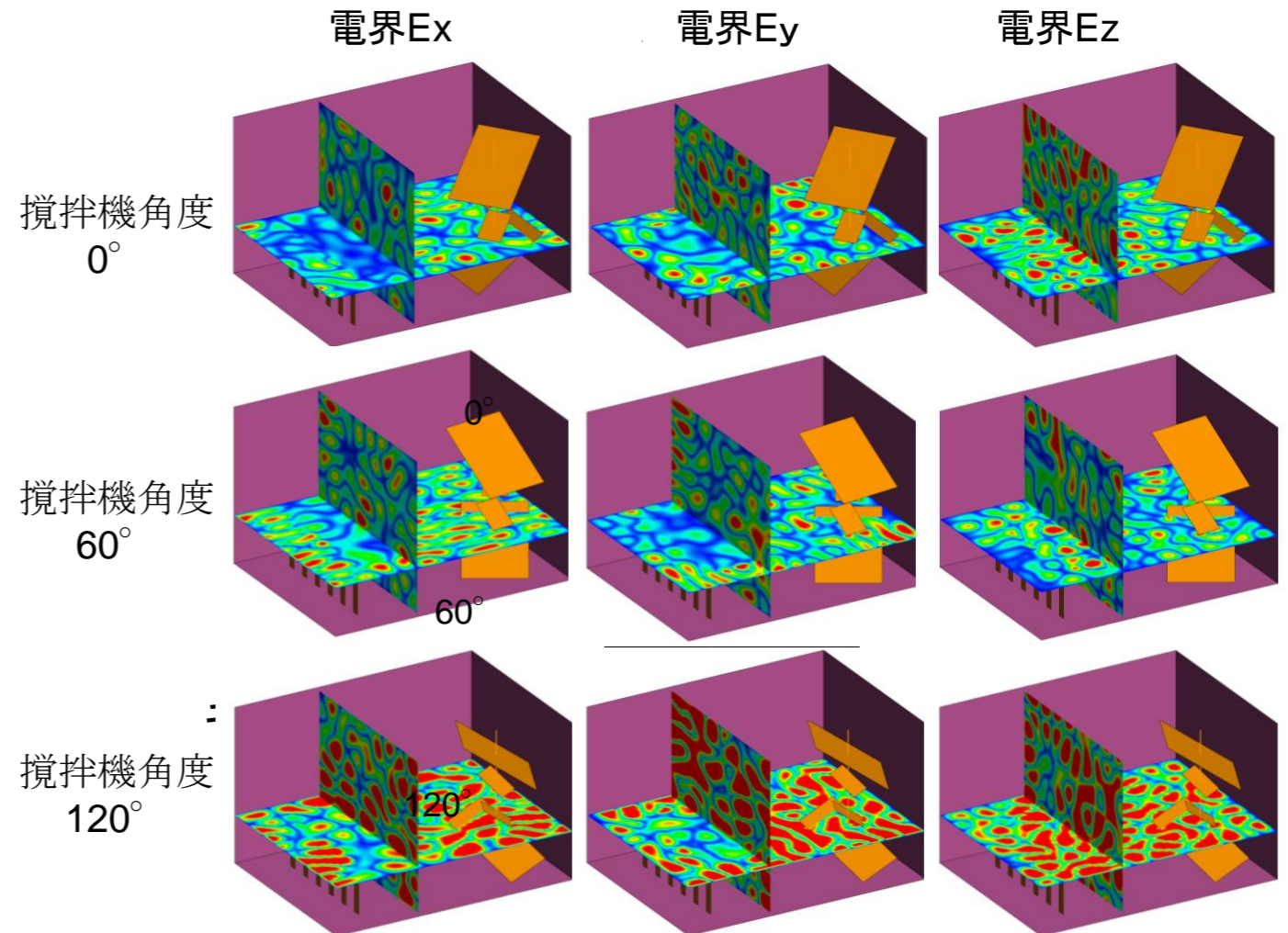
1. 自動車EMCと試験規格
2. 周波数の拡大と高周波帯での試験品質
3. リバブレーションチャンバーの要件とイミュニティ試験
4. リバブレーションチャンバーの放射エミッション測定への適用
5. まとめ

リバブレーションチャンバーとは

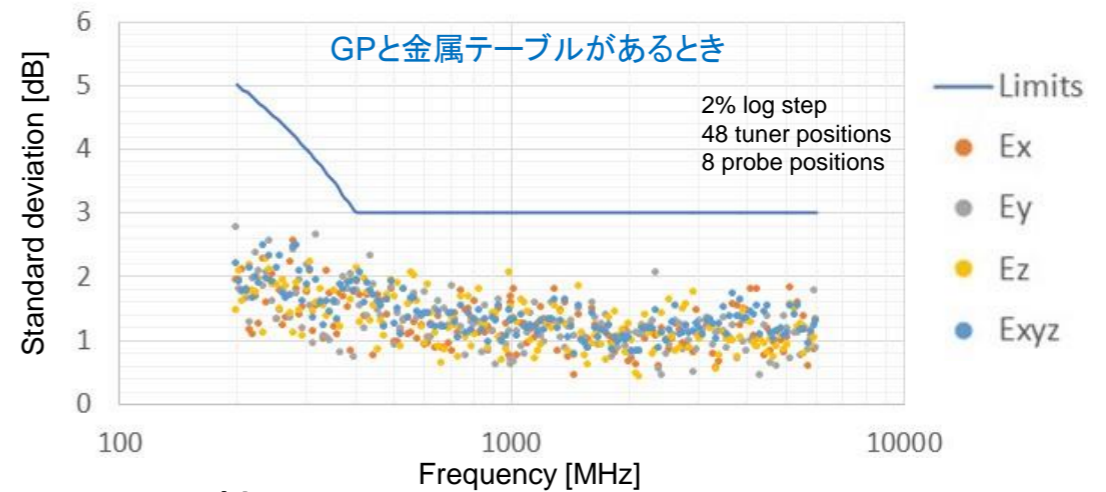
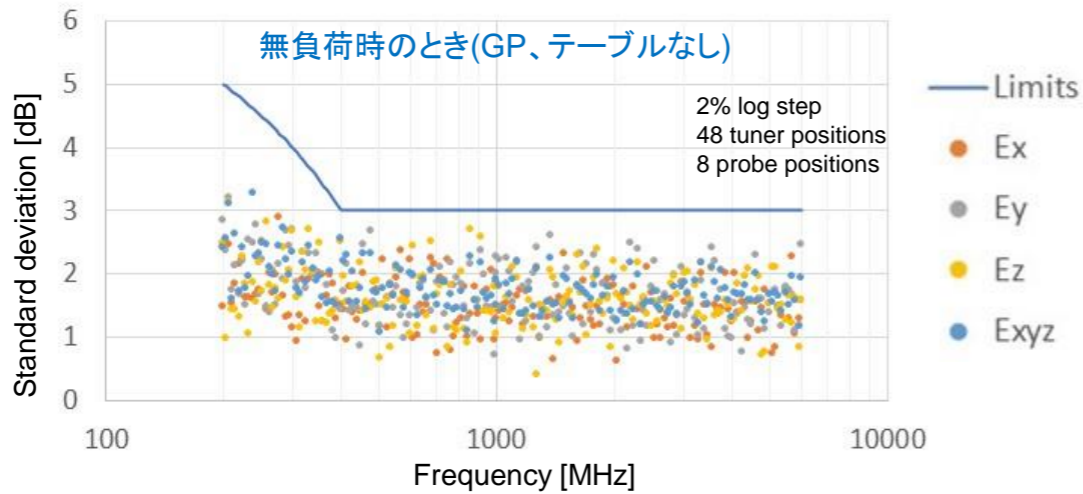
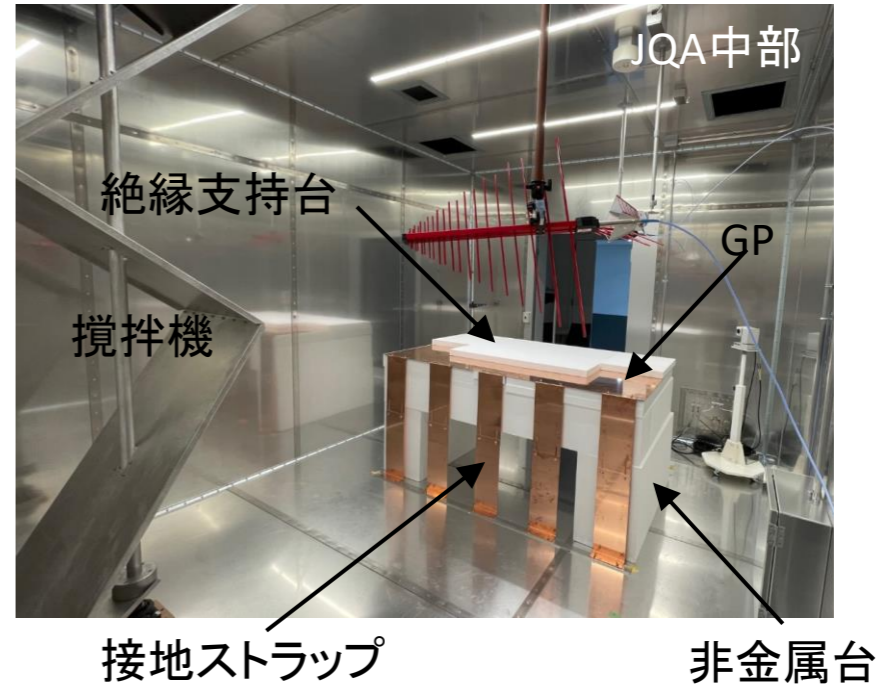
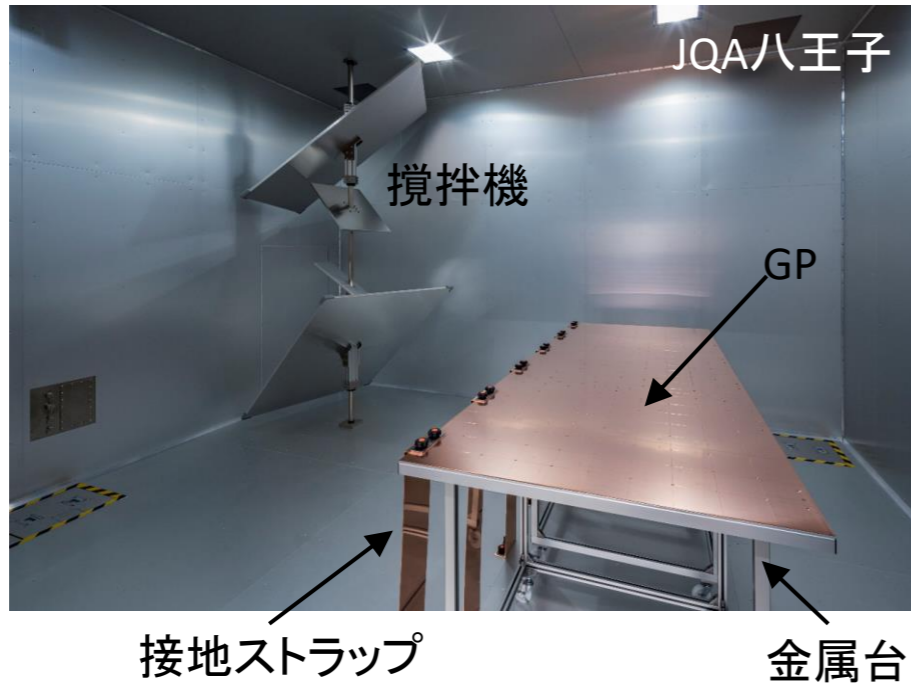
- シールドルームと攪拌機から構成される(電波吸収体、ターンテーブルが不要)
- シールドルームの空洞共振を利用して強い電磁界を発生させる
- 攪拌機の回転・移動によりランダムな電磁界分布を生成できる(統計的に均一)
- ALSE(電波暗室)法に比べると、小さなパワーアンプで試験電界を発生できる



リバブレーションチャンバーの構造の例
(IEC61000-4-21)



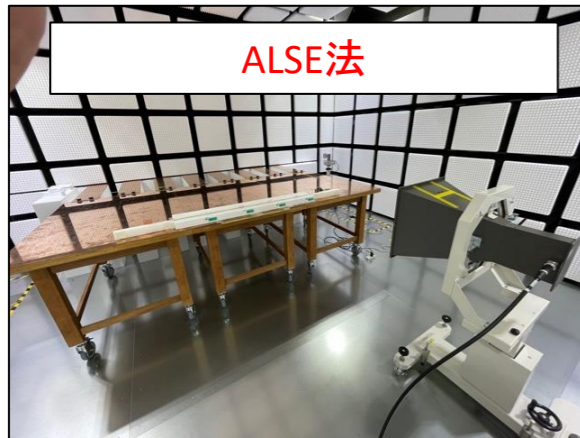
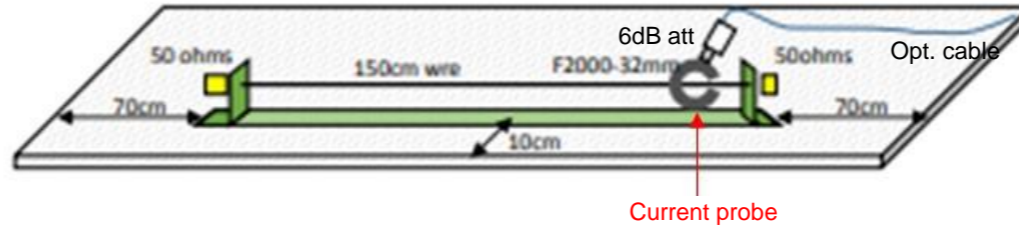
リバブレーションチャンバーの例



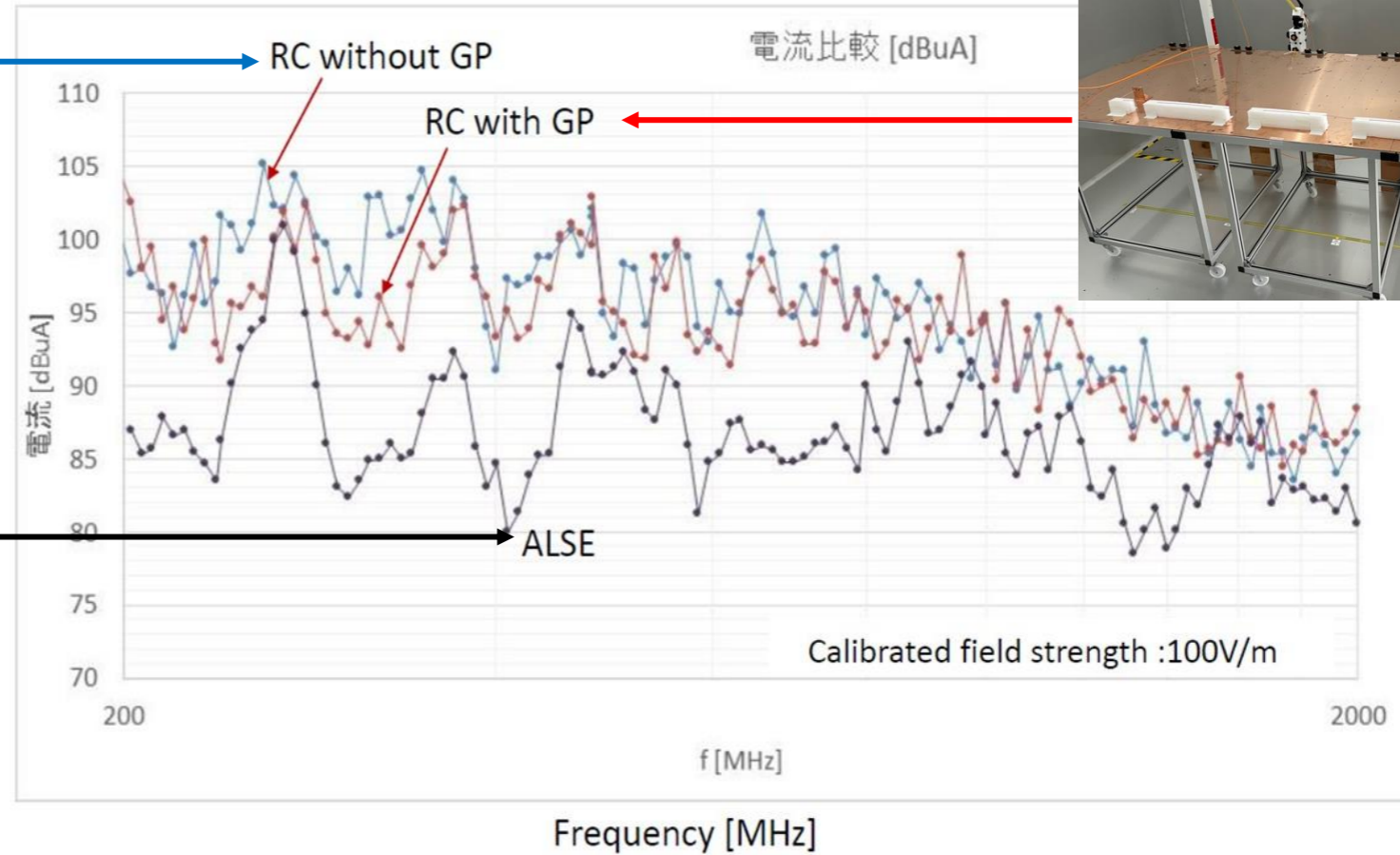
ワーキングボリュームの電界均一性

リバブレーションチャンバー法とALSE法との比較

- RC法: ISO11452-11に従い100V/mを設定
- ALSE法: ISO11452-2に従い100V/mを設定
- 1.5mハーネスの誘起電流を測定

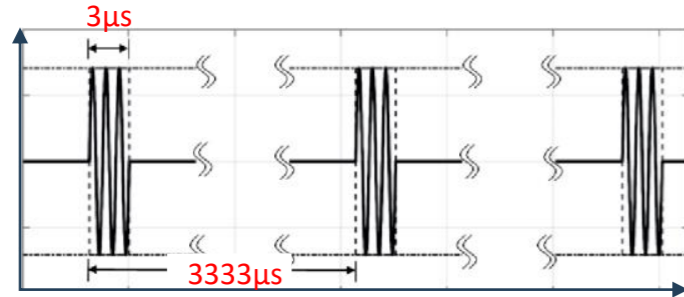


ハーネスに誘起する電流 [dBuA]

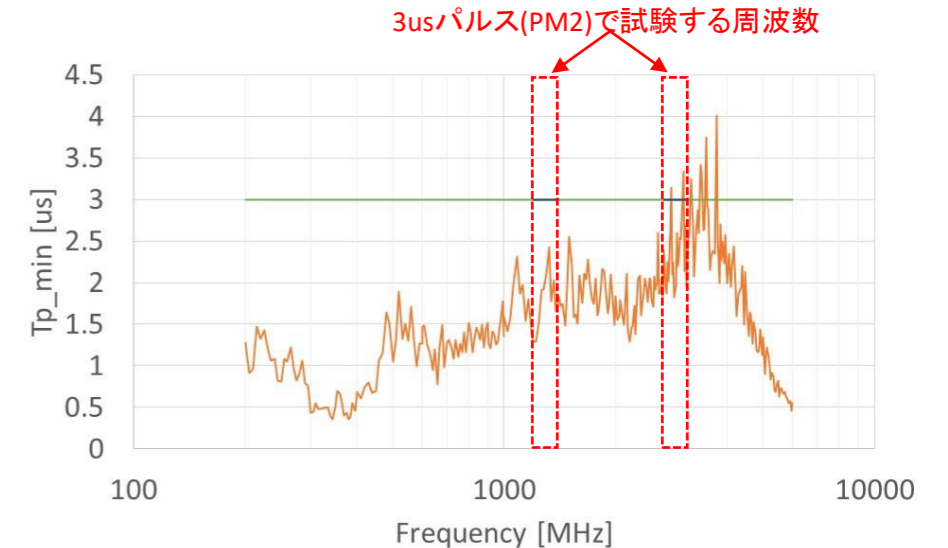


レーダーパルス試験のためのリバブレーションチャンバーの要件

- パルス幅 $3\mu\text{s}$ のレーダーパルスを実施するには、使用するリバブレーションチャンバーが時定数の要件を満たす必要がある。PM2の試験がある

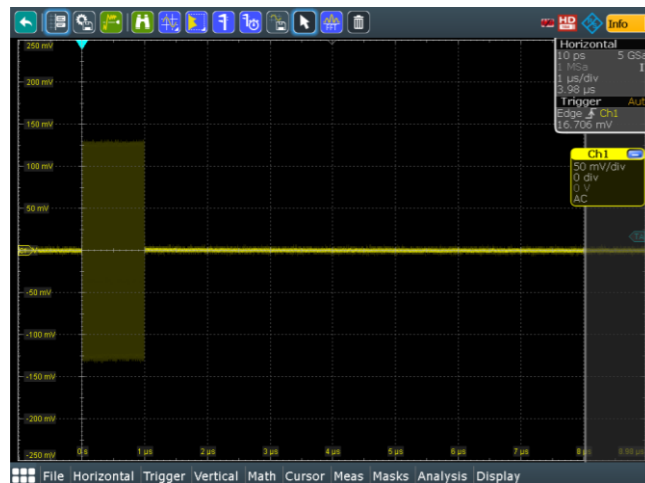


レーダパルス(PM2)の波形

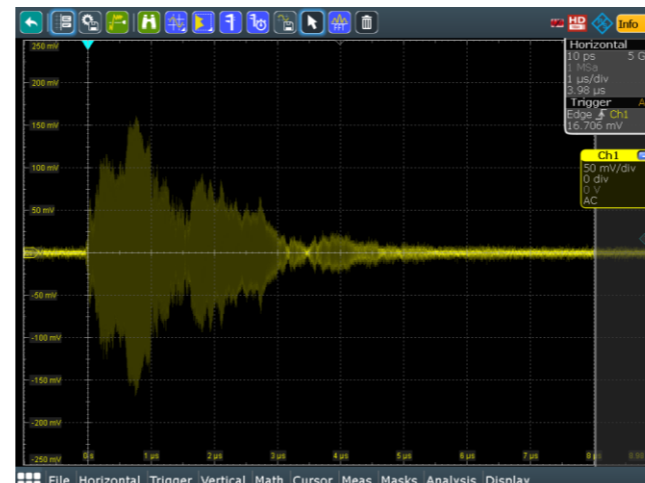


Tp_minの例

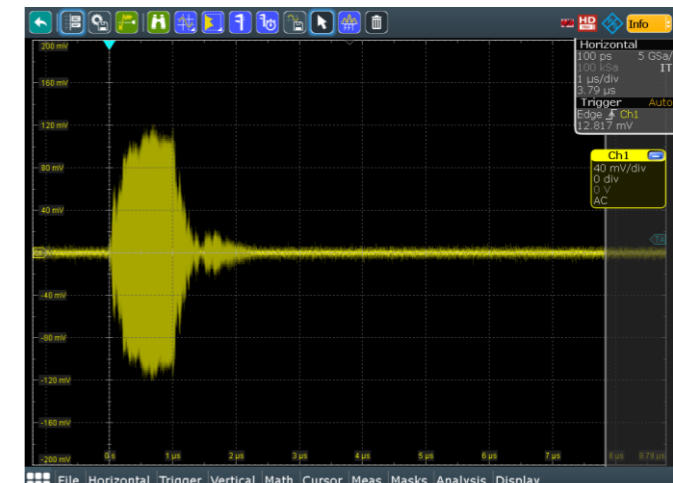
- ISO11452-11(2010)では、時定数は試験法の観点から2.5を乗じた値Tp_minで規定されている。Tp_minは、試験可能な最小パルス幅を示している。



同軸ケーブルを接続して測定



RVC測定 発泡スチロールが置かれた状態
攪拌機角度0度



RVC測定 電波吸収体を少し入れた状態
攪拌機角度0度

リバブレーションチャンバー法の長尺ケーブルの対応

- 次世代自動車にとって通信ネットワークのEMC品質確認は重要項目
- ECUに任意の長さの車載通信ケーブルを接続して試験できる
例えば、車載EthernetのOPEN allianceの15mも可能

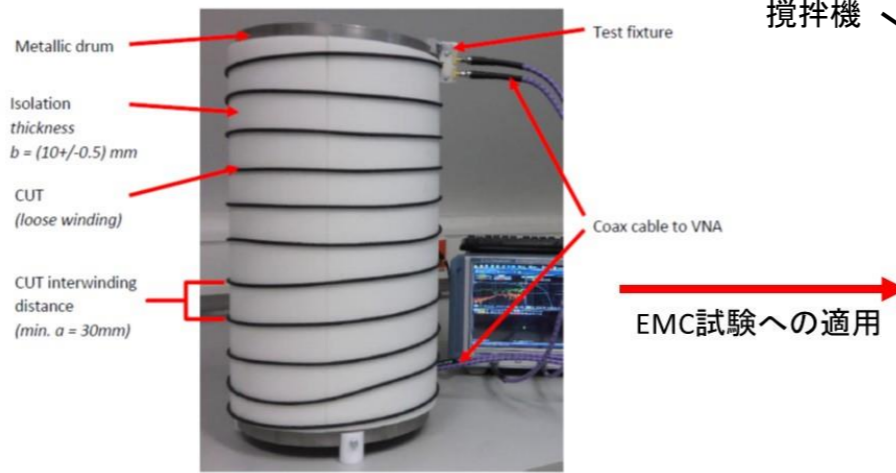
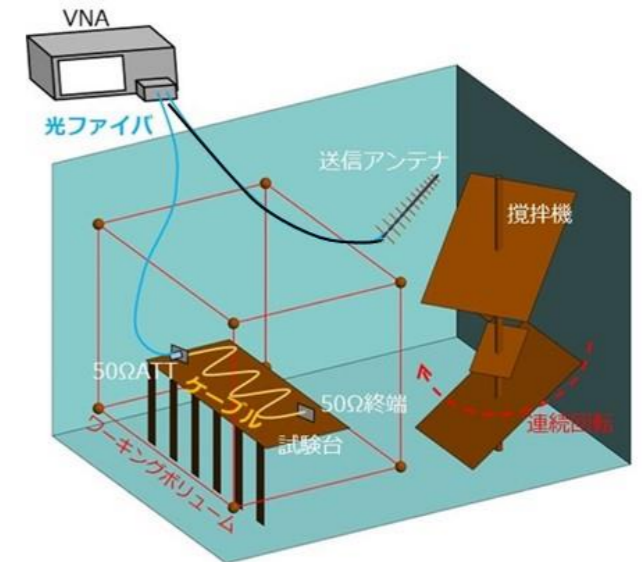
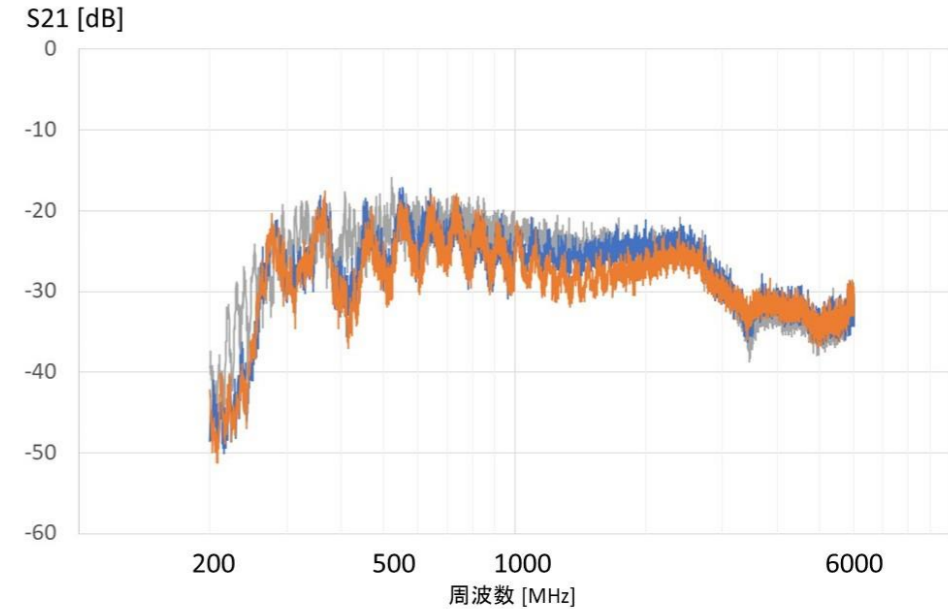
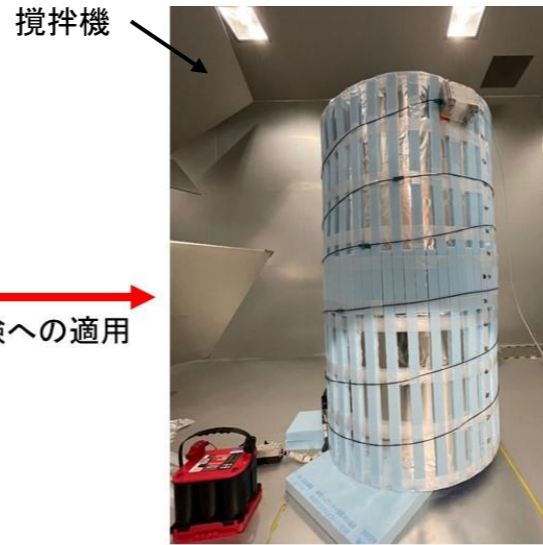


Figure A-1: Example for cable arrangement used for S-Parameter and TDR measurements

15m長のケーブルのSパラ測定



実際のRVCでの試験

IEEE 100BASE-T1
Definitions for
Communication Channel
Version 1.0

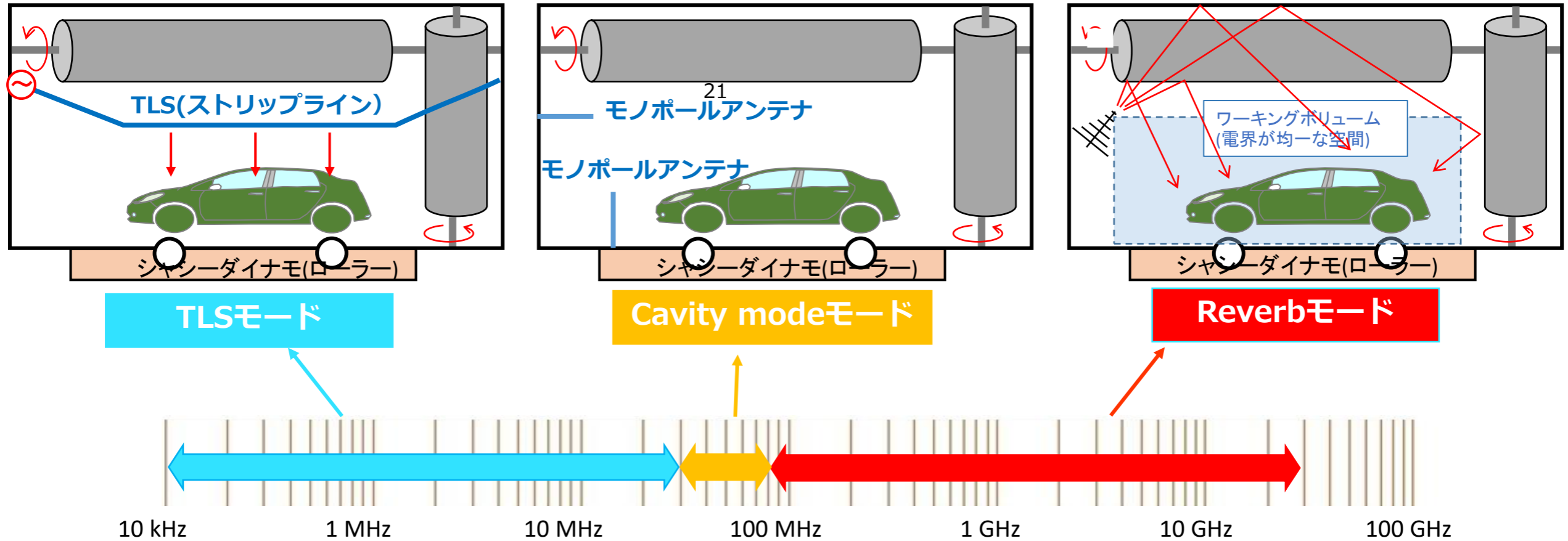
OPEN
ALLIANCE

Author & Company	Dr. Bernd Körber, FTZ Zwickau
Title	Definitions for Communication Channel
Version	1.0
Date	June 15, 2017
Status	Final version
Restriction Level	Public

This measurement specification shall be used as a standardized common scale for evaluation of general RF requirements for a physical layer communication channel to enable 100Base-T1 technology.

自動車用リバブレーションチャンバー法ISO11451-5(2023)

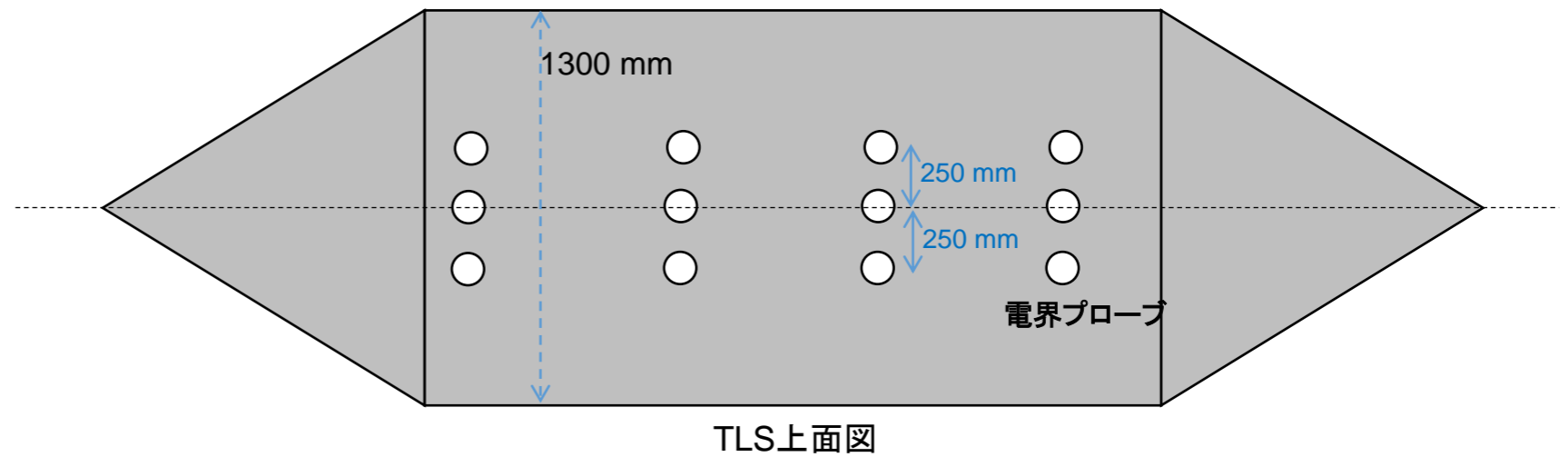
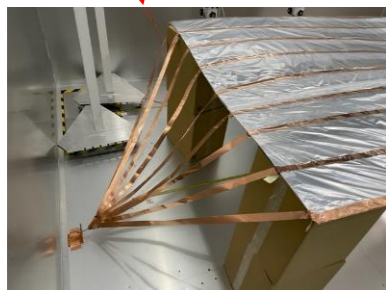
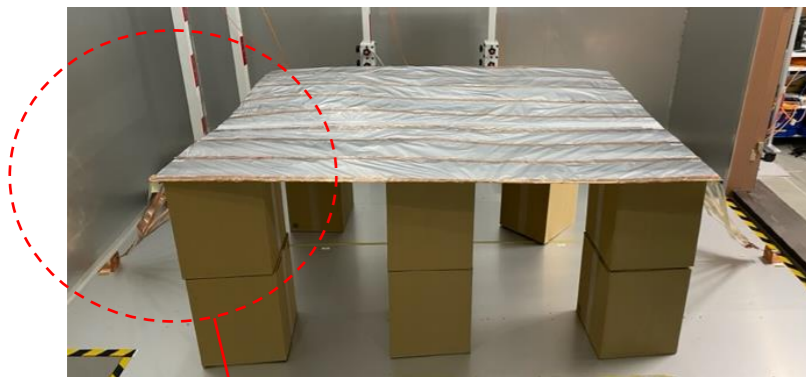
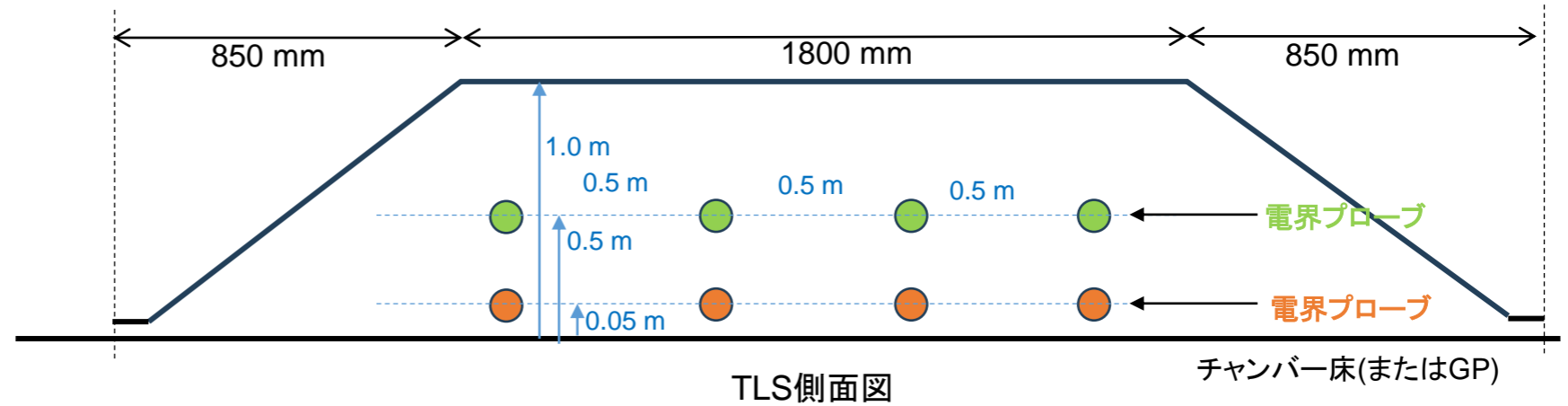
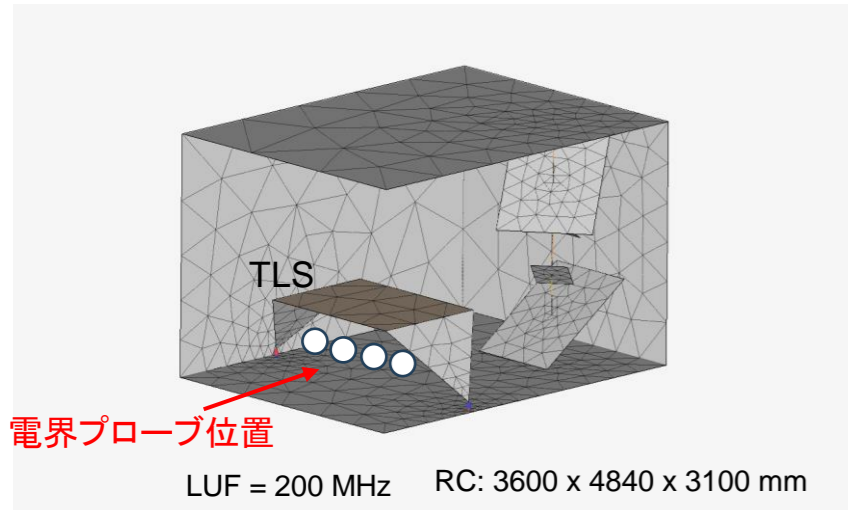
- ステップモードと連続回転モード
- 高速攪拌(Fast stirring)
- VIRC(Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber) : テントタイプ



- 100kHzから6GHzまで連続して試験できる
- 部品イミュニティ試験ISO11452-11は、現在改正作業中です

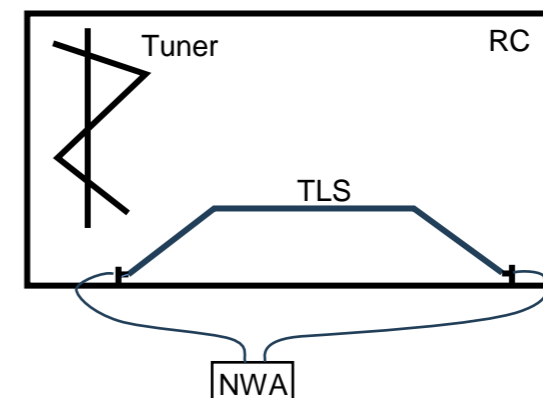
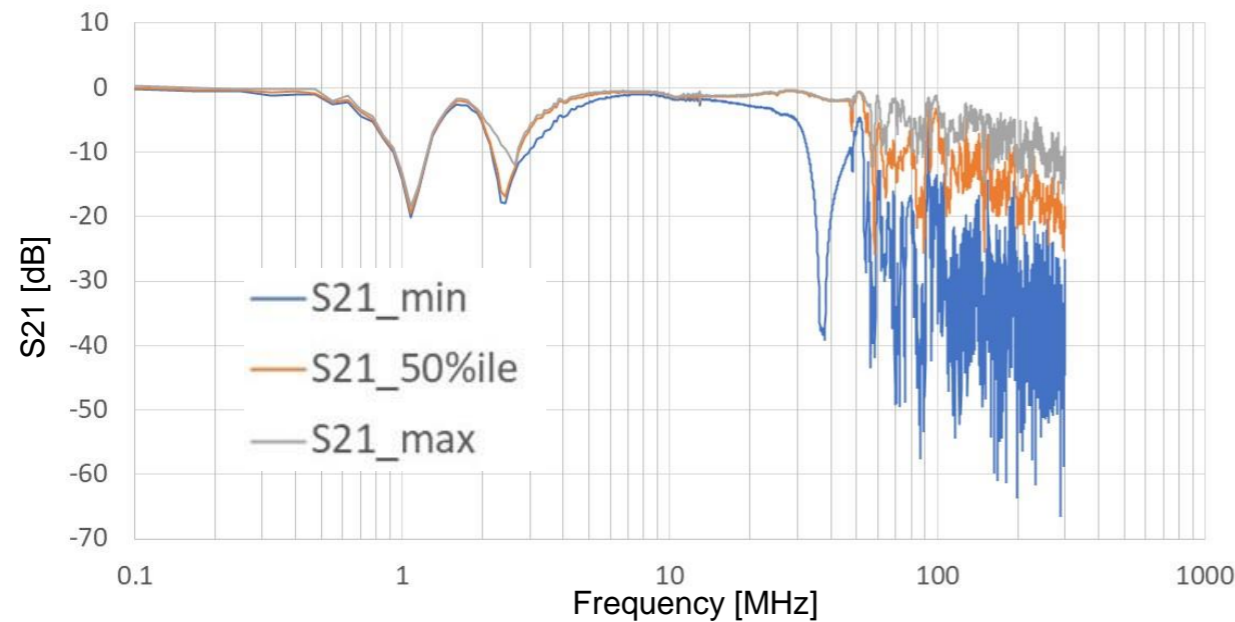
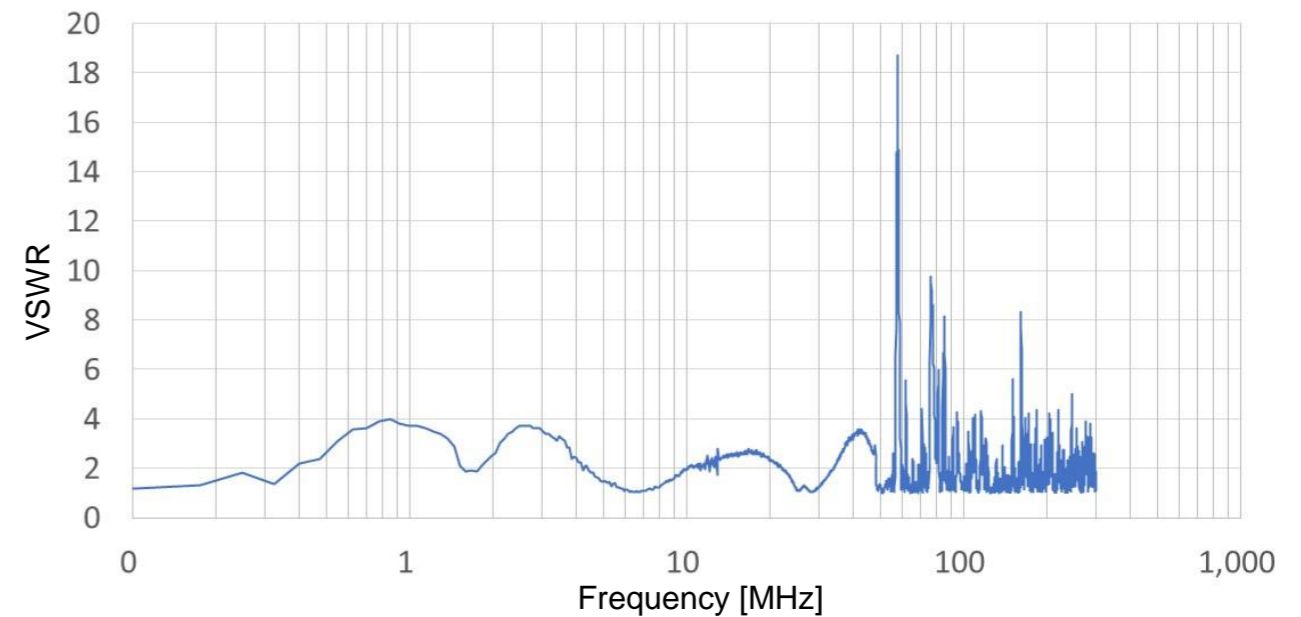
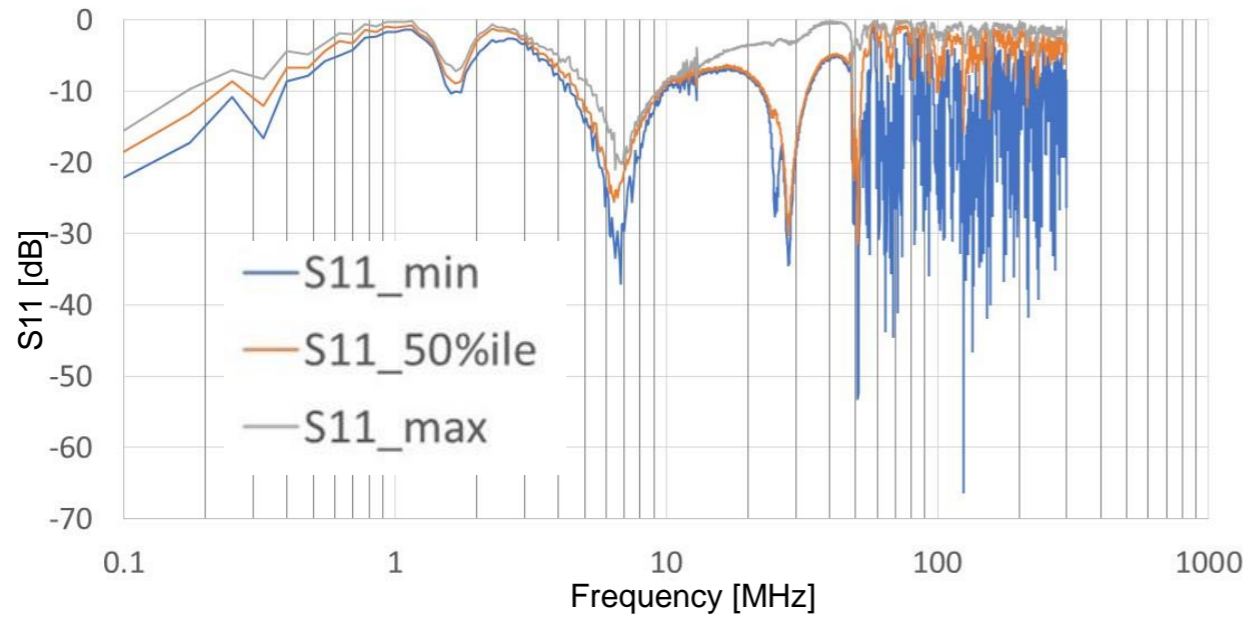
TLSモード試験

TLS : transmission line system



電界プローブの配置詳細

リバブレーションチャンバーに置いたTLSの特性

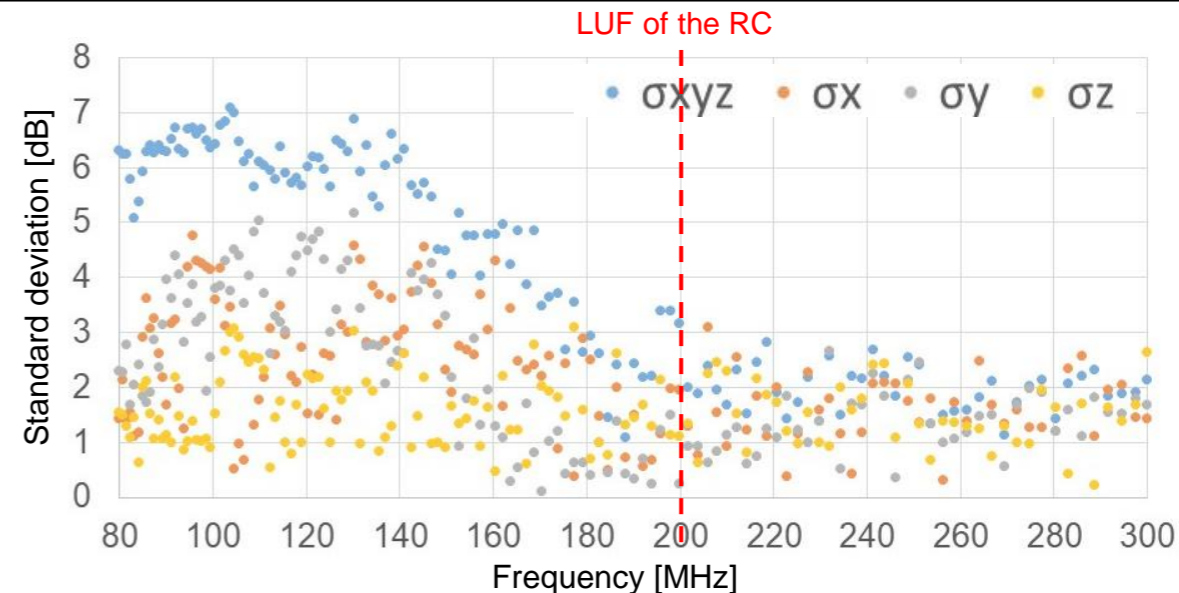
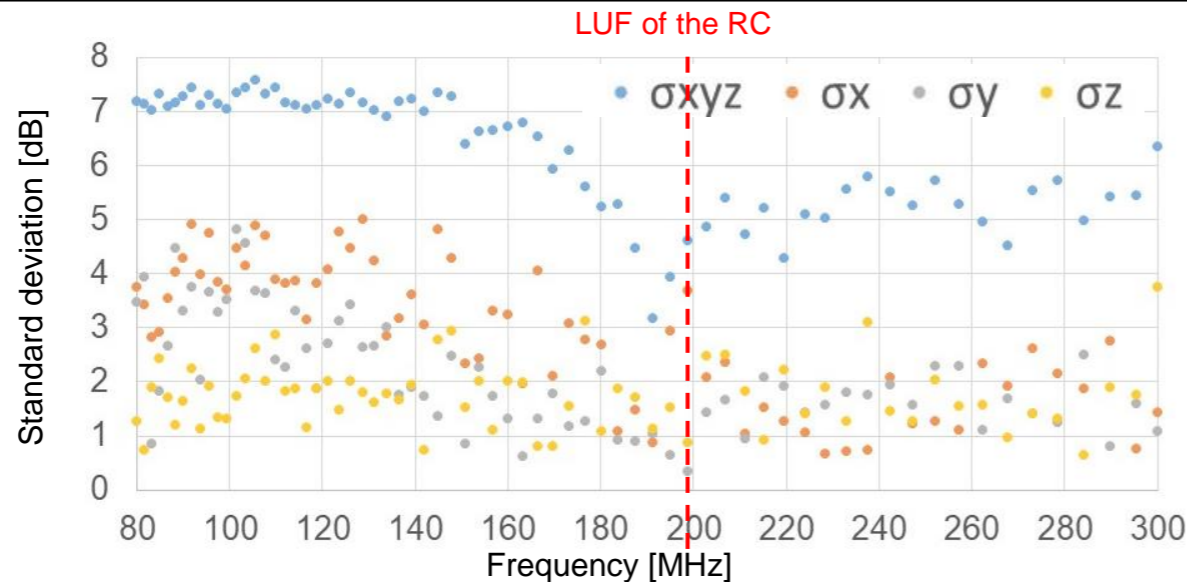


Sパラ測定

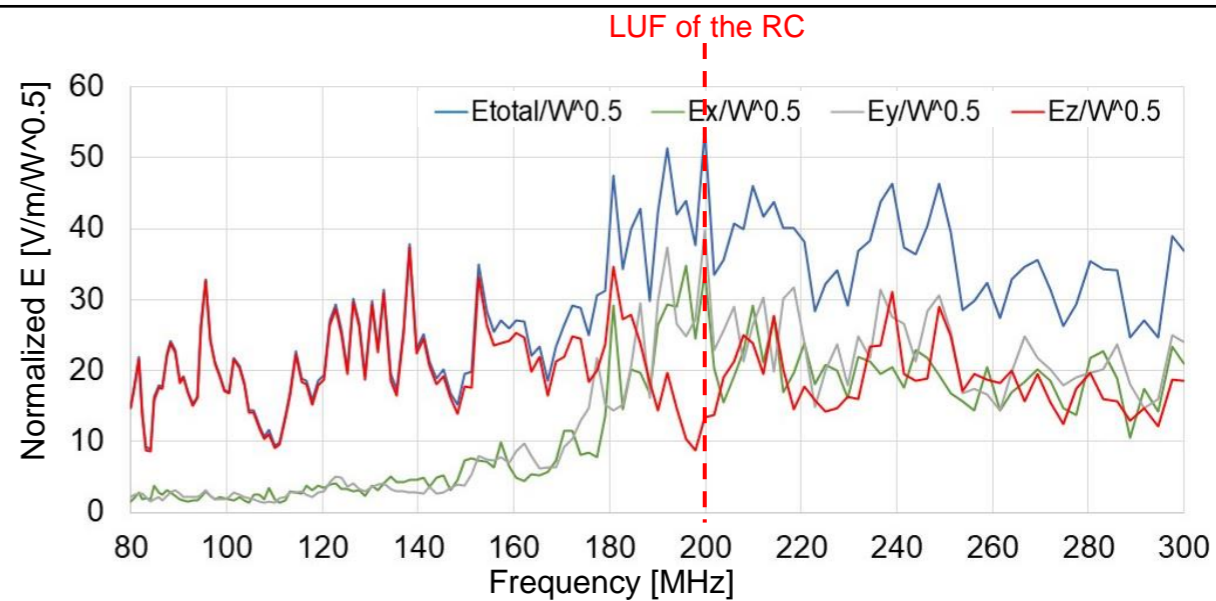
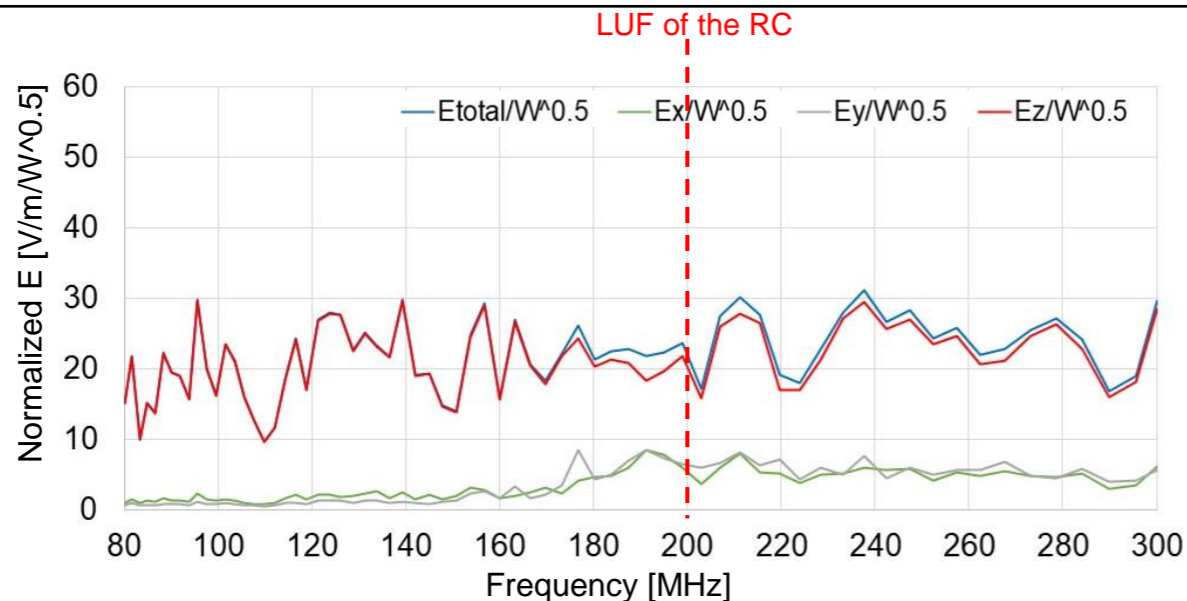
5cm高においた12個の電界プローブ

50cm高においた12個の電界プローブ

12個の電界
プローブの
標準偏差 σ

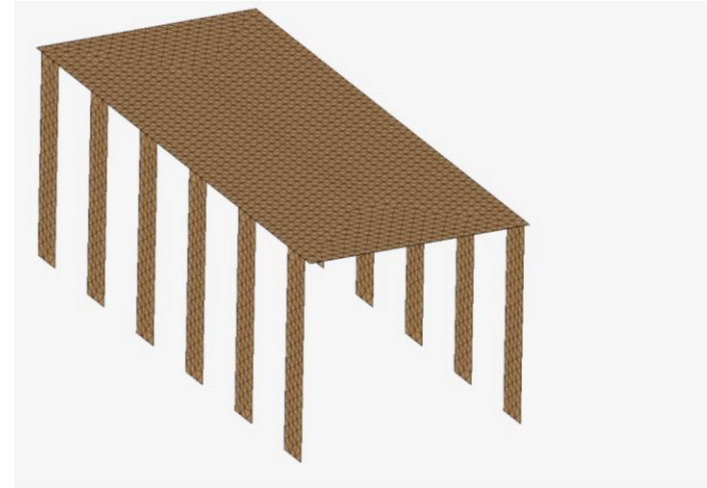


正規化
電界強度

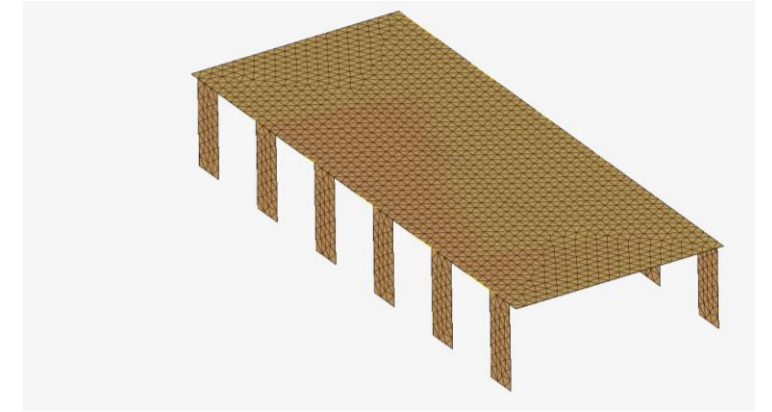


グラウンドプレーンの例

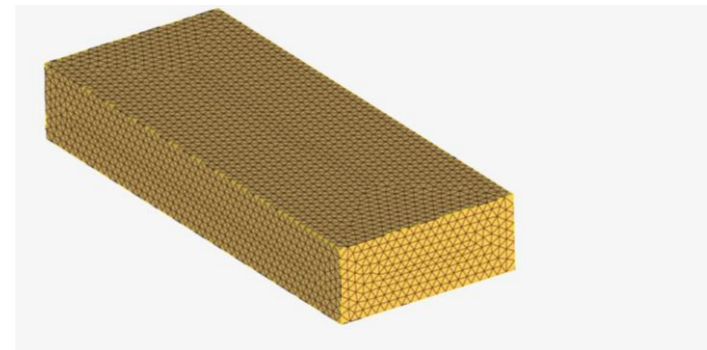
- グラウンドプレーンは、できるだけ電氣的に安定するよう設置する
- 例えば、両辺のボンディングや金属箱状にする
- これは、テーブルから離れていく配線に対してEMC対策がしやすくなる効果もある



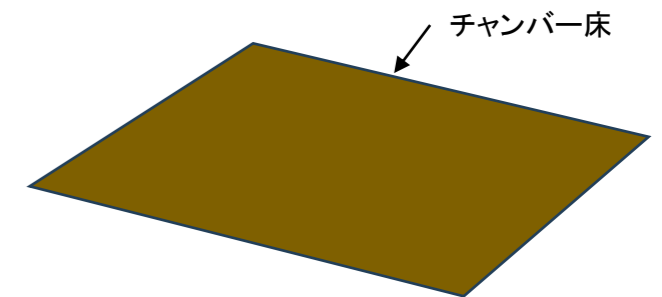
テーブル高900mm程度の場合



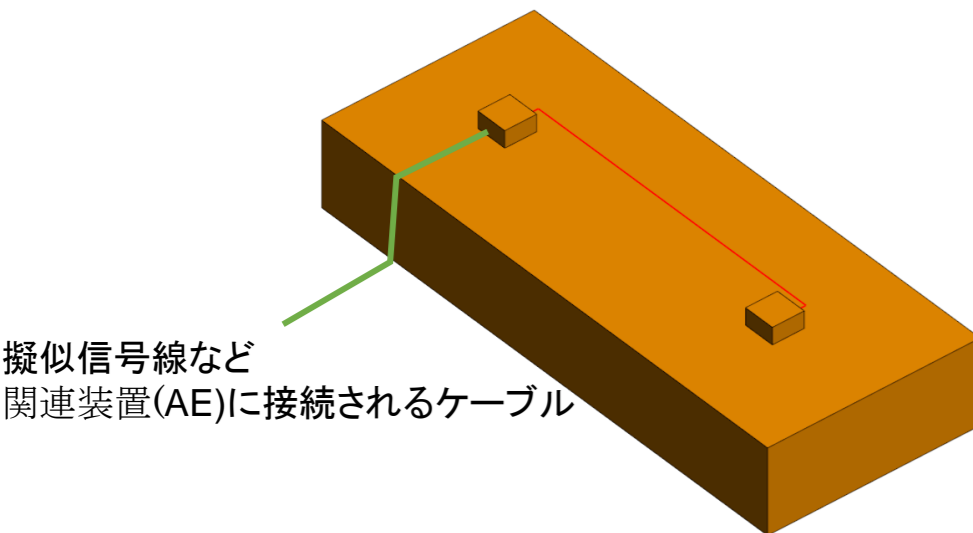
テーブル高400mm程度の場合1



テーブル高400mm程度の場合2
(金属ボックス)



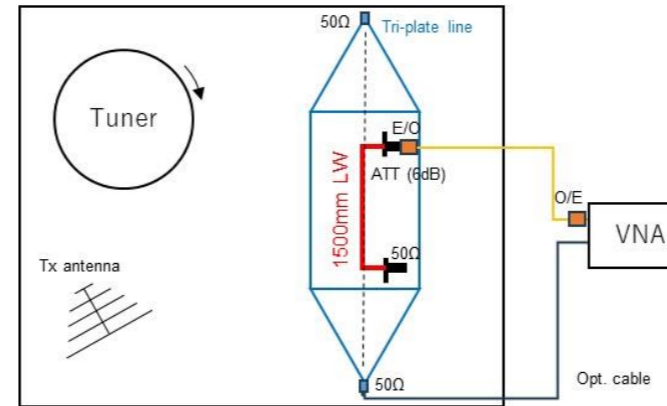
テーブルは用いずチャンバー床を使用する場合



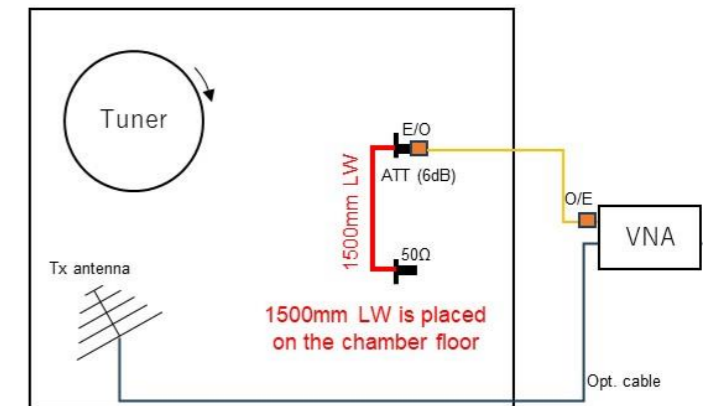
擬似信号線など
関連装置(AE)に接続されるケーブル

リバブレーションチャンバとトリプレートラインの組み合わせ

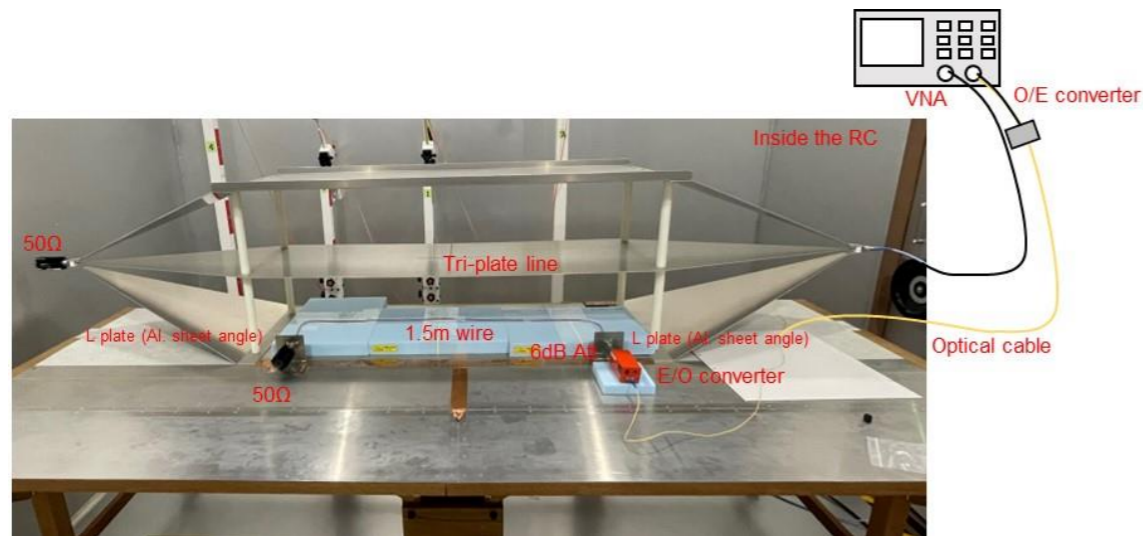
- S21 測定
 - 右図の2つ
 - 1500 mm long wire with 50Ω at both ends was used as a DUT
 - 攪拌機のアングルステップ数：48
- TLSモードにトリプレートラインを使用することは可能である
- セプタム高は0.3mのため、EUTサイズはやや制限される
- トリプレートラインを利用する場合は、TLSモードからリバーブモードへの移行を300MHz~400MHz辺りに設定して、運用するのが良いと思われる



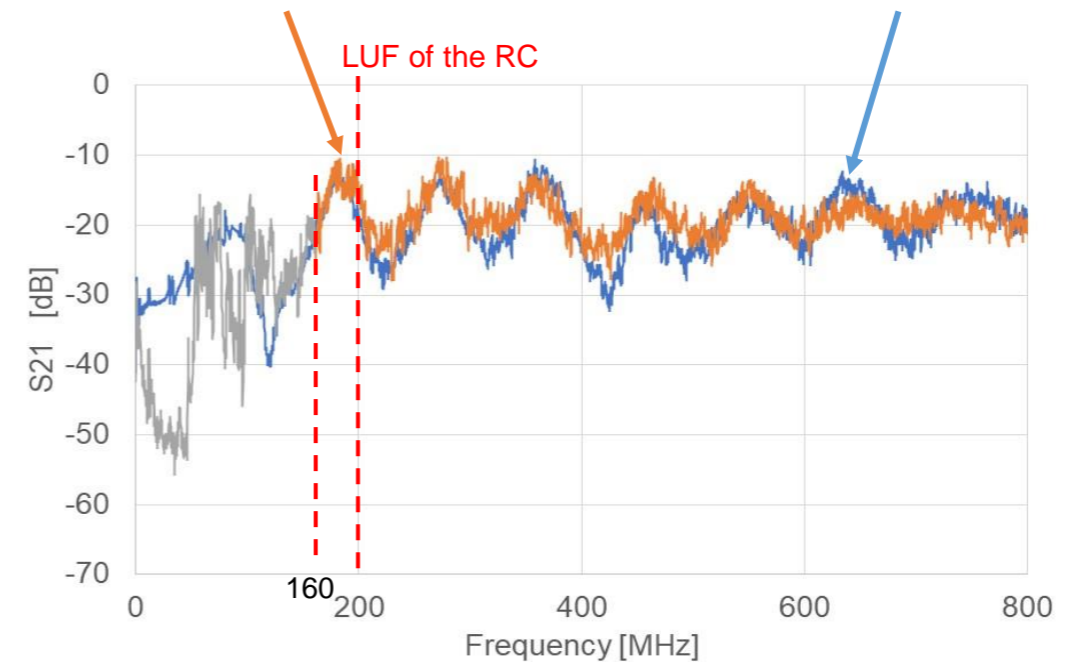
TSLモードの測定



リバーブモードの測定



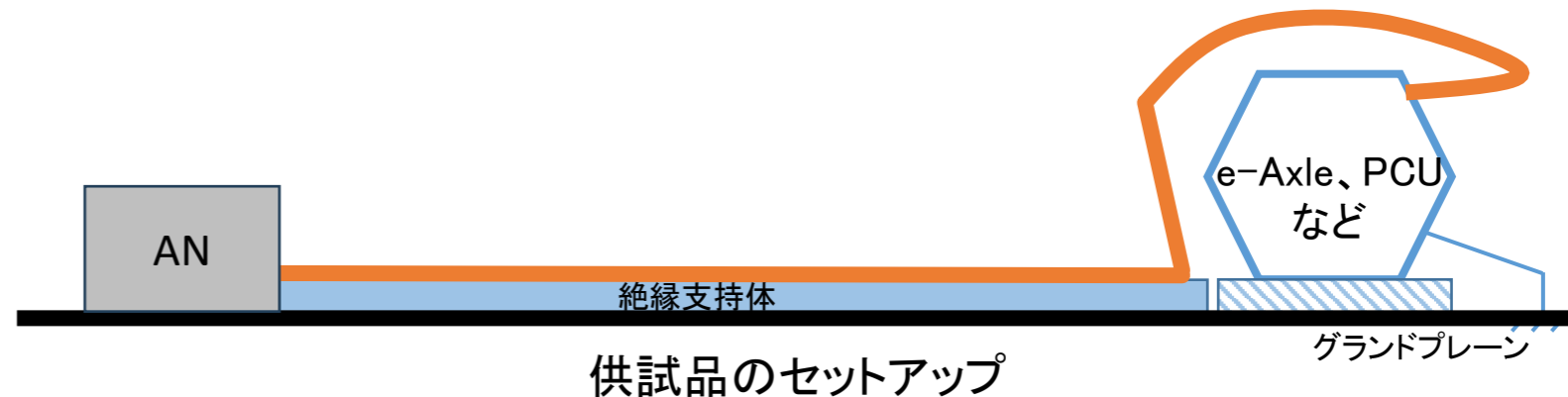
トリプレートライン



As LPDA covering from 160 MHz was used for Reverb mode, S21 curve is shown in grey color in the frequency range below 160MHz.

大きなサイズの車載機器にはどの試験法を用いるか

- 既存の試験法は、大きな車載機器の試験に困る場合がある
- e-Axle, PCU, ヘッドランプ、スピードメータなどはサイズが大きい
- 高い位置にコネクタが付いていると、ALSE法ではハーネスがグランドプレーンから浮き上がる
- EUTの向きを3方向に変えて試験するのはほとんど不可能
- GTEMやBCIでも容易には試験できない



本日のアジェンダ

1. 自動車EMCと試験規格
2. 周波数の拡大と高周波帯での試験品質
3. リバブレーションチャンバーの要件とイミュニティ試験
4. リバブレーションチャンバーの放射エミッション測定への適用
5. まとめ

リバブレーションチャンバーによるエミッション測定の実例紹介

● 測定概要

- 周波数: 1 GHz ~ 6GHz
- 攪拌機ステップ数: 24 及び 連続回転
- チャンバー校正: VNA (4001ポイント)によるS21測定
- Rxホーンアンテナの受信レベル: ESW (RBW=1MHz)による peak検波測定

● EUTの放射電力“P_{radiated}”の計算

- average received power ----- $P_{Radiated} = \frac{P_{AveRec} \times \eta_{Tx}}{CVF}$
- peak received power ----- $P_{Radiated} = \frac{P_{MaxRec} \times \eta_{Tx}}{CLF \times IL}$
- Peak (max) received power -----

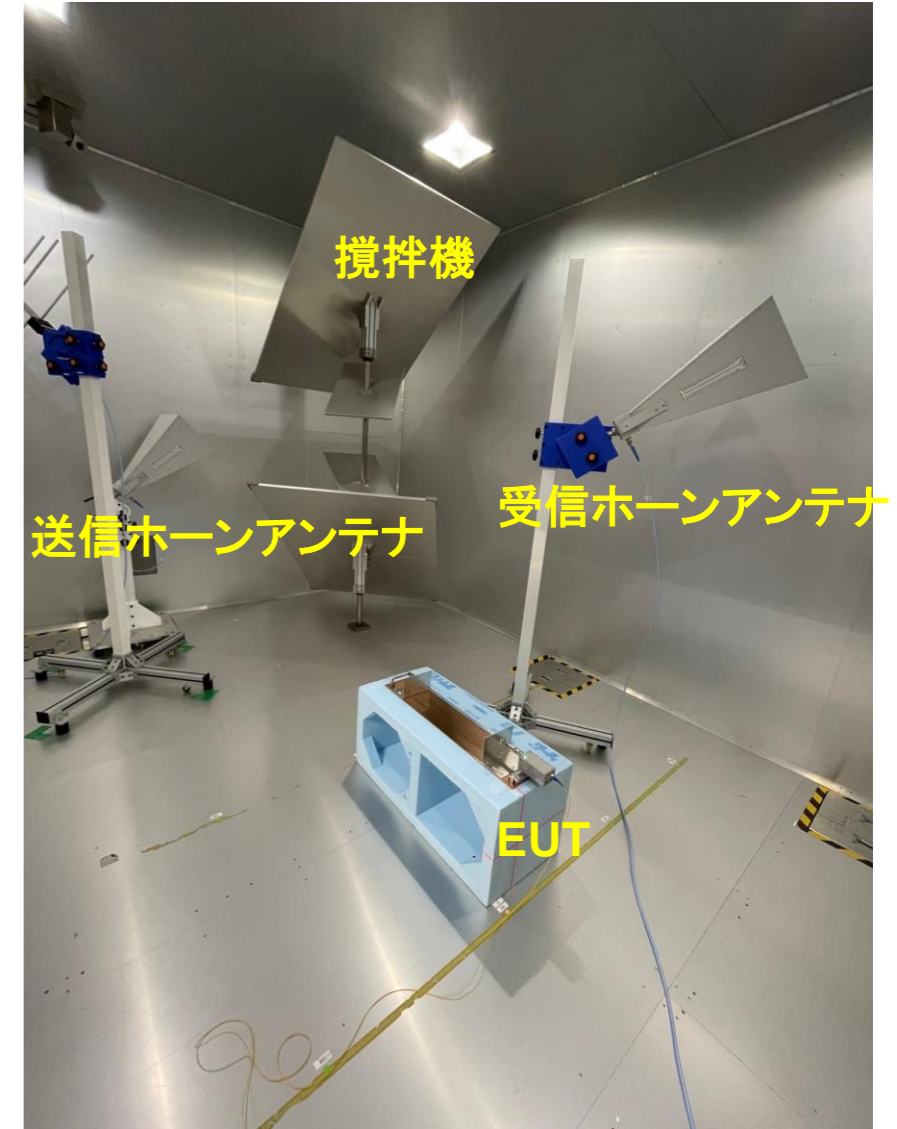
● EUTの放射電力から電界強度への変換

- EUTの最大指向性の算出: IEC61000-4-21 の式E.6

$$D = \begin{cases} 1,55 & \text{for } ka \leq 1 \\ 0,5 \left(0,577 + \ln(4(ka)^2 + 8ka) + \frac{1}{8(ka)^2 + 16ka} \right) & \text{for } ka > 1 \end{cases} \quad (E.6)$$

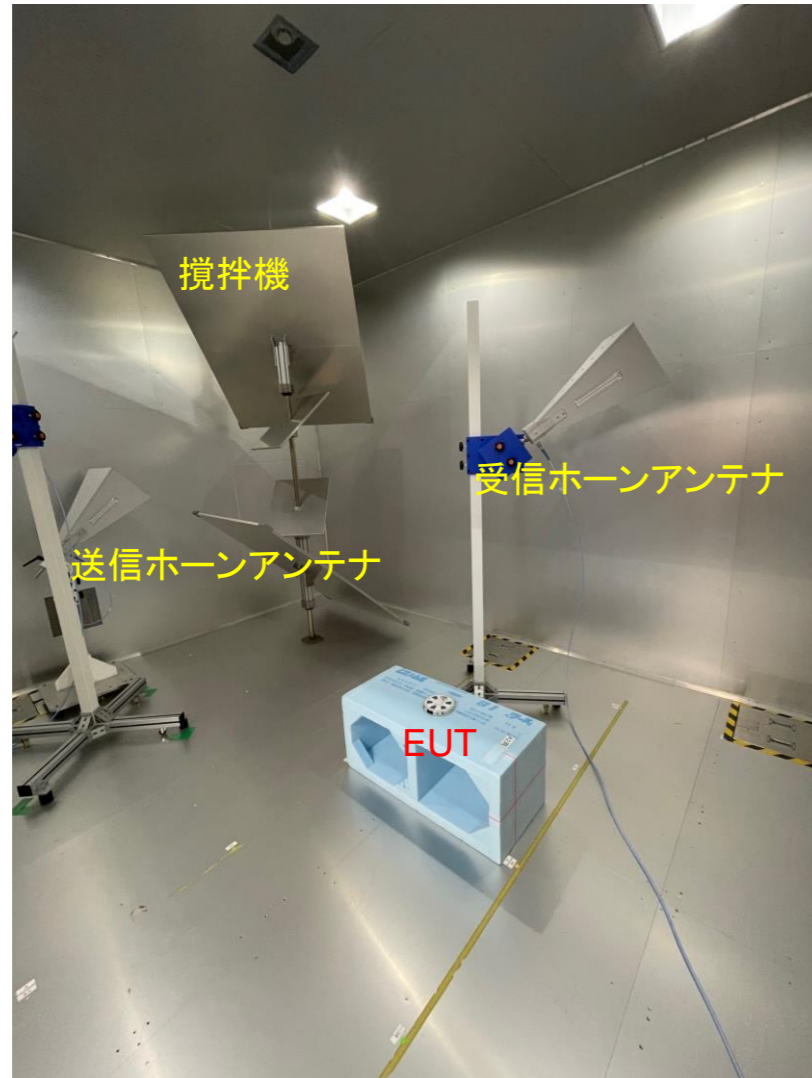
- 距離Rでの電界強度の計算(自由空間)

$$E_{Radiated} = \sqrt{\frac{D \times P_{Radiated} \times \eta_0}{4\pi R^2}}$$

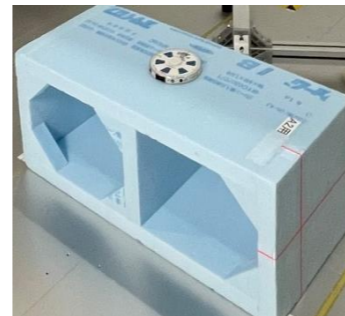


測定例 1

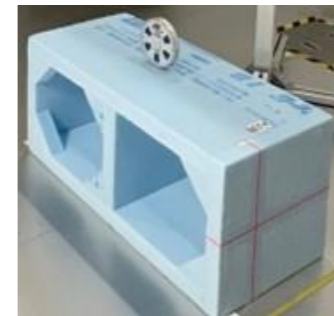
- EUT: コムジェネレータ CGO5100B
CGO5100B manual (<https://documentation.com-power.com/pdf/CGO-5100B-2.pdf>)



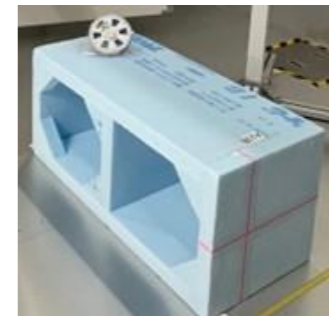
RVC: 3600 x 4840 x 3100 mm LUF = 200 MHz



EUT 配置 A



EUT 配置 B



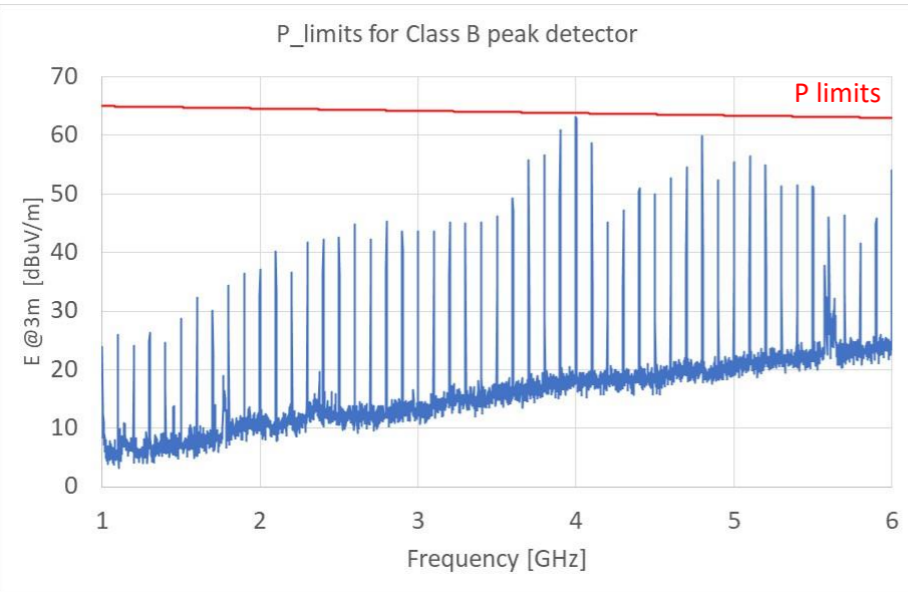
EUT 配置 C

測定例1の結果: 電界強度@3m

	Average received power 攪拌機ステップ数24	Peak received power 攪拌機ステップ数24	Peak received power 連続回転
EUT配置 A			
EUT配置 B			
EUT配置 C			

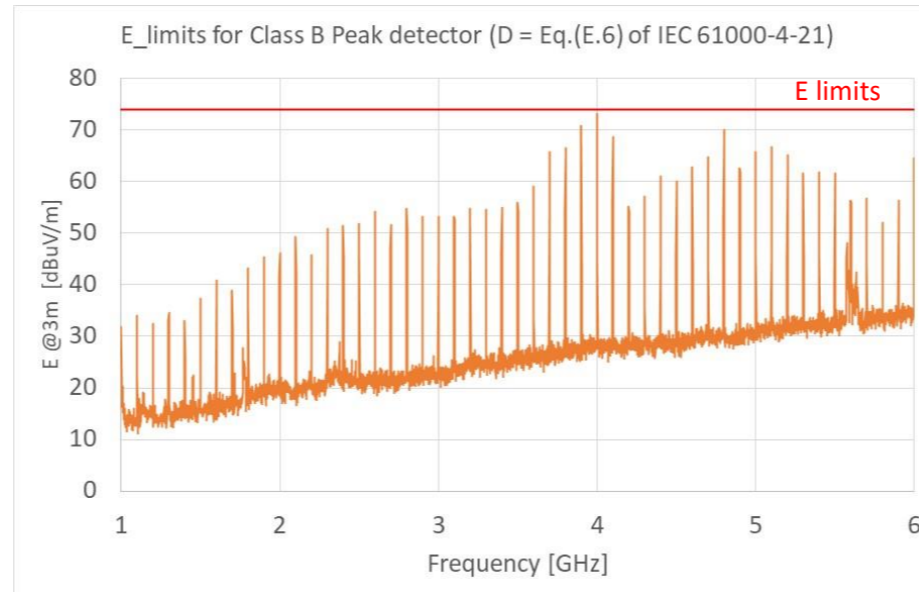
測定例1の結果: 電界強度@3m

- 評価方法の違いの比較をEUT配置Aの場合で示す



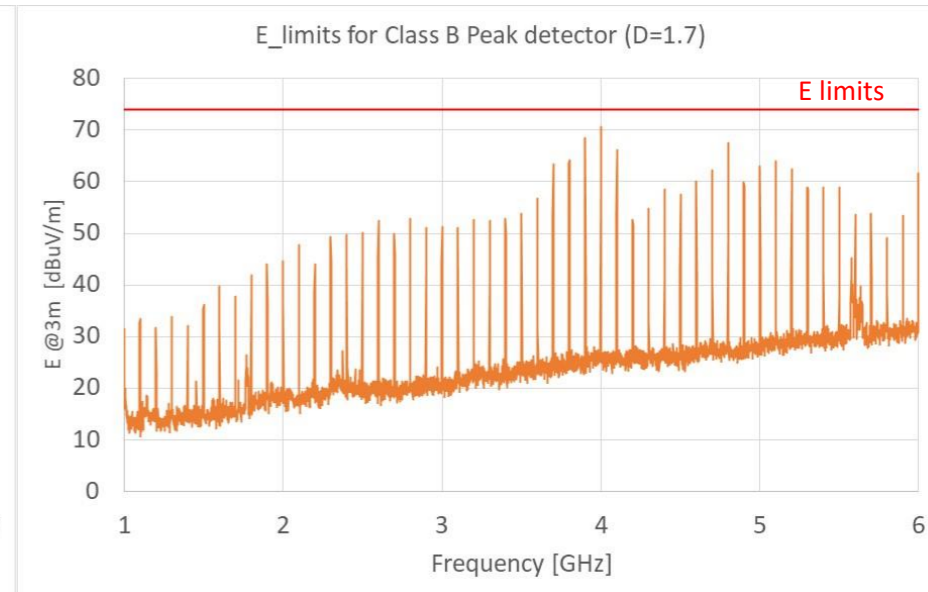
CISPR32のCD(CISI_671e_CD)による評価

- peak received powerを使用
- 大きさが半径0.1mまでのEUTの場合で計算
- 上図の限度値は、クラスBピーク検波[dBpW]
- FAR(6面暗室)とRCの変換係数についてはCISPR TR16-4-5(2021)に基づく



IEC61000-4-21(2011)による評価

- EUTの電力から電界強度への変換にIEC61000-4-21の式E.6)を使用
- EUTの最大半径 $a = 0.0745$ [m]
- 上図の限度値は、CISPR32 FSOATSのクラスBピーク検波[dBuV/m]



IEC61000-4-21(2011)による評価

- EUTの電力から電界強度への変換にIEC61000-4-21の注に書かれている $D=1.7$ を使用
- EUTの最大半径 $a = 0.0745$ [m]
- 上図の限度値は、CISPR32 FSOATSのクラスBピーク検波[dBuV/m]

リバブレーションチャンバーと CISPR25 のALSE法の比較

RVC (IEC61000-4-21)

- 測定概要
 - 周波数: 1 GHz ~ 6GHz
 - 供試品: CISPR25のロングワイヤ
 - 攪拌機ステップ数: 24 及び 連続回転
 - チャンバー校正: VNA (4001ポイント)によるS21
 - 受信レベル: ESW (RBW=1MHz)による peak検波測定

● EUTの放射電力“Pradiated”の計算

- Average received power:

$$P_{\text{Radiated}} = \frac{P_{\text{AveRec}} \times \eta_{\text{Tx}}}{\text{CVF}}$$

● EUTの放射電力から電界強度への変換

- EUTの最大指向性の算出: IEC61000-4-21 の式E.6

$$D = 0.5 \left(0.577 + \ln(4(ka)^2 + 8ka) + \frac{1}{8(ka)^2 + 16ka} \right) \quad (\text{E.6})$$

EUTの半径: $a = 0.354$ [m]

- 距離Rでの電界強度の計算(車載機器ではR=1m)

$$E_{\text{Radiated}} = \sqrt{\frac{D \times P_{\text{Radiated}} \times \eta_0}{4\pi R^2}}$$

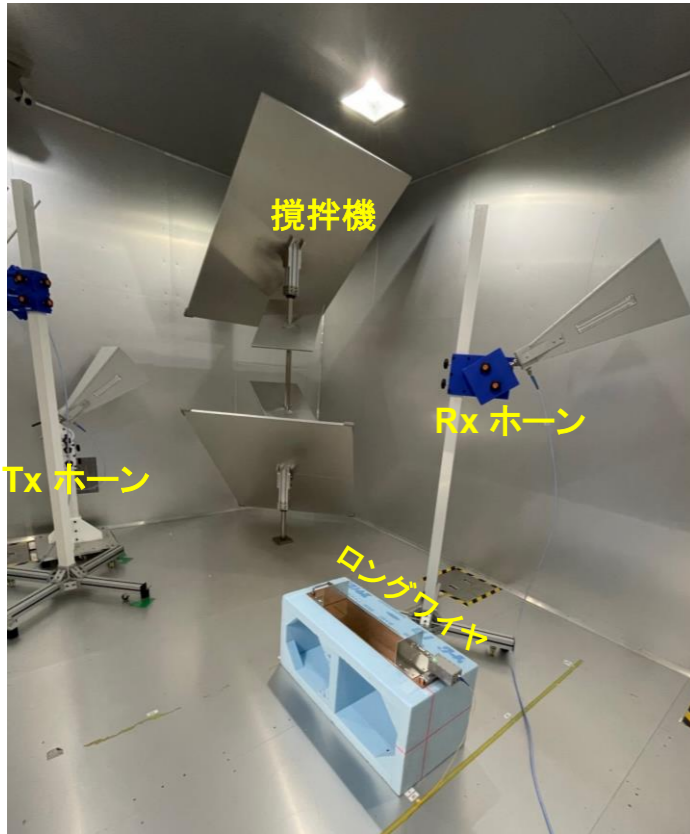
ALSE (CISPR 25)

● 測定概要

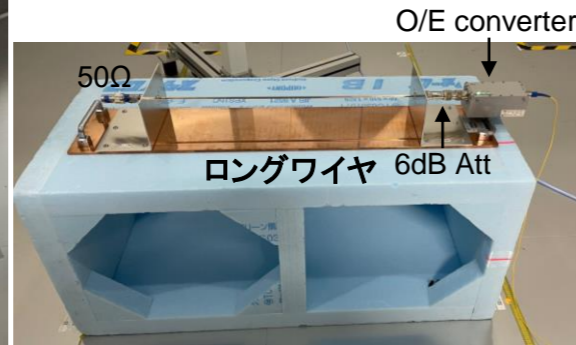
- 周波数: 1 GHz ~ 6GHz
- CISPR25のロングワイヤ
- 偏波: 垂直と水平
- アンテナ位置: CISPR25のロングワイヤ中央
- 受信レベル: ESW (RBW=1MHz)による peak検波測定

リバブレーションチャンバーと CISPR25 のALSE法の比較

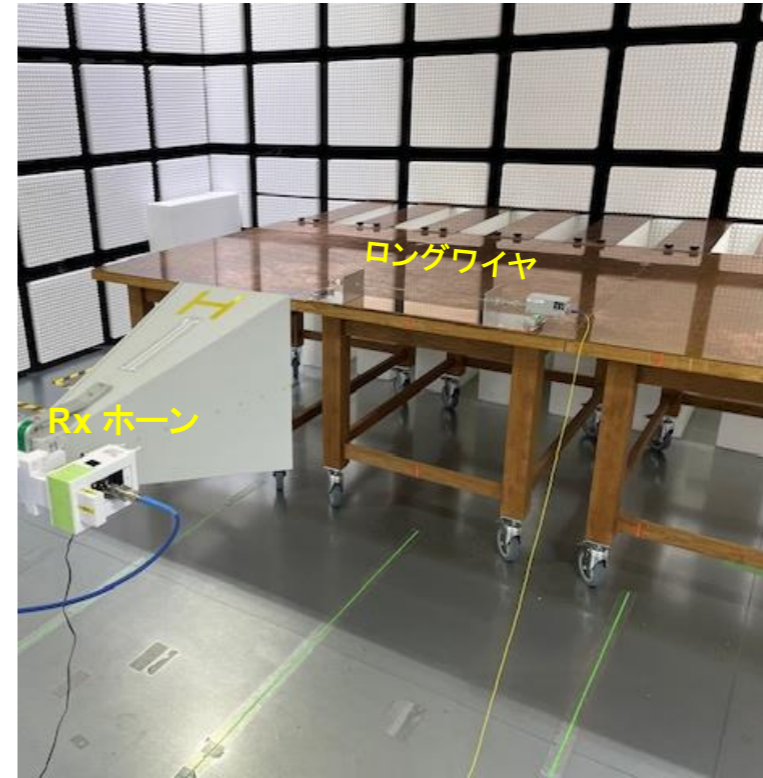
- EUT: CISPR25 ロングワイヤ (暗室検証に使う装置)



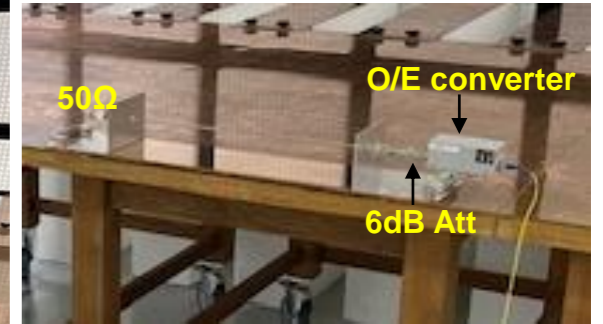
リバブレーションチャンバーでの測定



EUT配置1



ALSEでの測定



EUT position 1



EUT position 2

リバブレーションチャンバーと CISPR25 のALSE法の比較

EUT の位置	リバブレーションチャンバー Average received power 24 ステップ、半径a = 0.0745 [m]	ALSE		
		垂直・水平の最大値(=Max(V, H))	垂直偏波	水平偏波
配置 1				
配置 2				
リバブ vs ALSE				

平均値検波測定 of 課題 測定方法

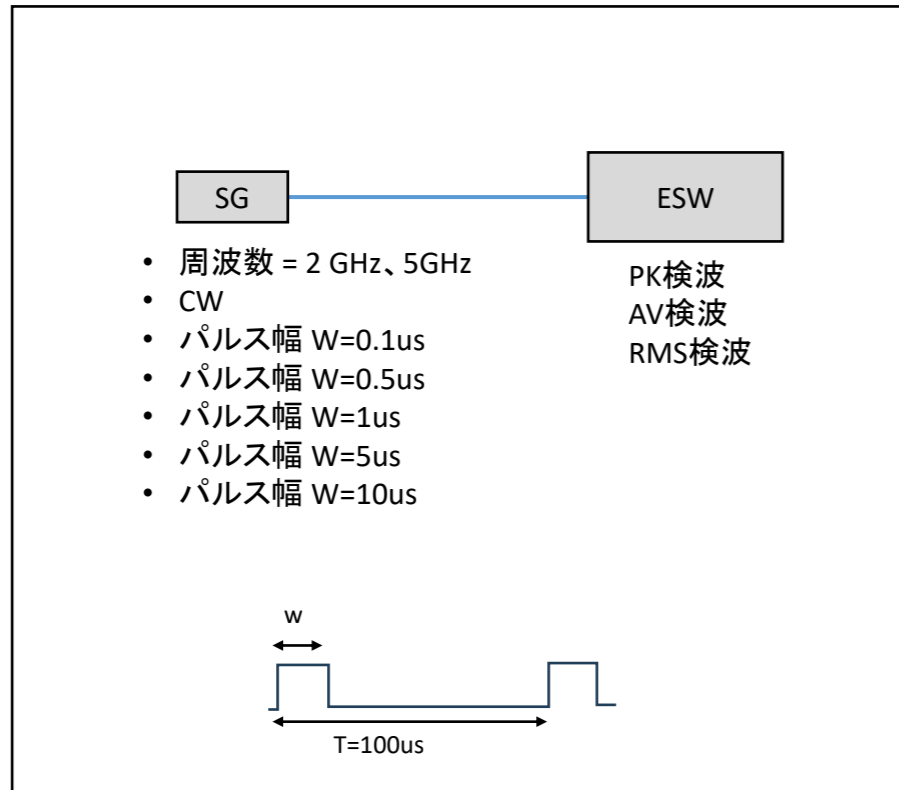
リバレーションチャンバーではパルス波形が崩れるためパルス幅が狭いと正しく測定できない可能性がある

- 下記の2つの測定を実施
- 直結測定を基準にRVCの結果を比較する
- 測定データはCWの受信レベルで正規化する

Application of Reverberation Chamber for Radiated Emission Testing for Wireless Protection
Toward Full-Scale Deployment of 5G System—Advantages and Challenges

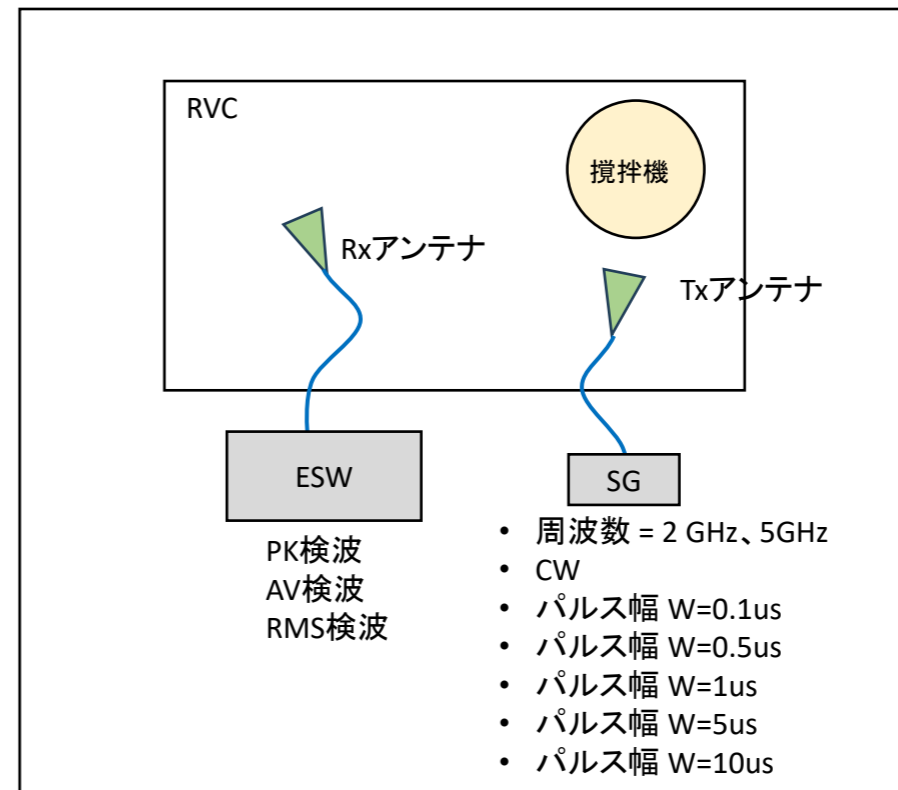
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10192380>

DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3298368



同軸線で直結して測定

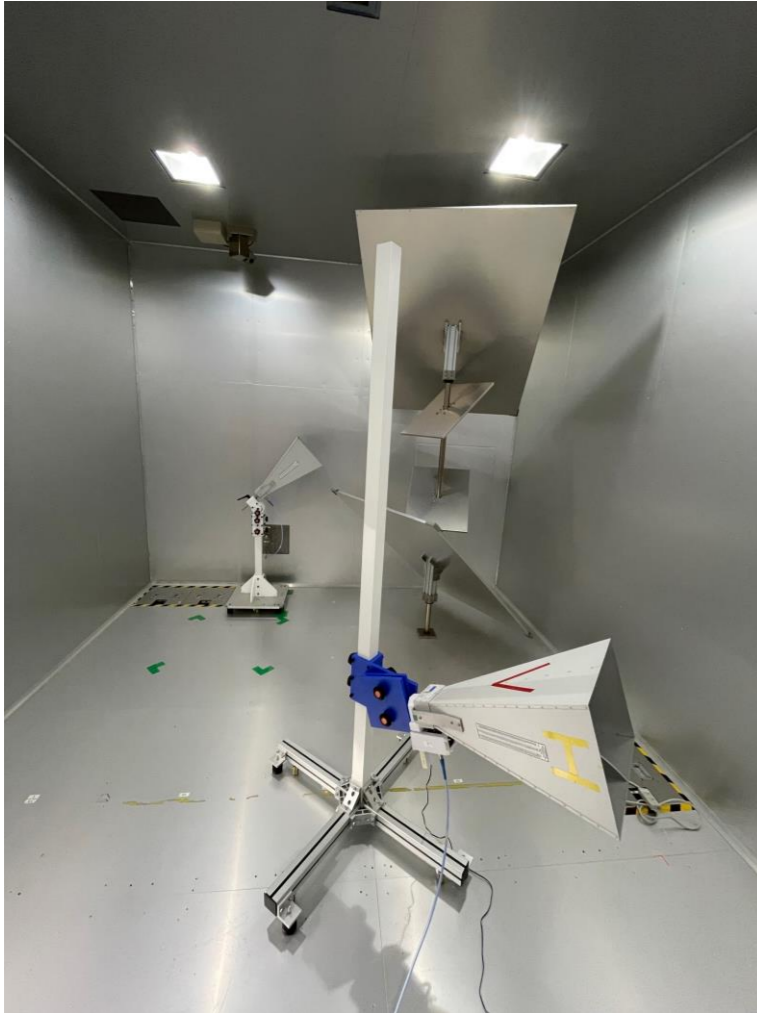
比較



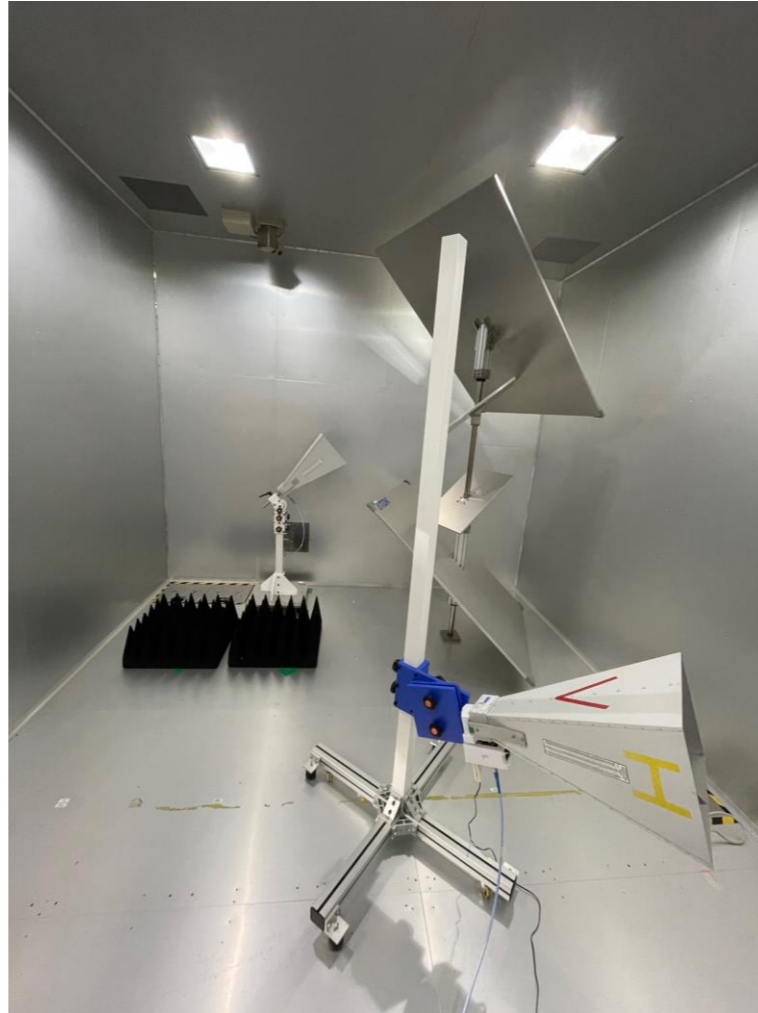
RVCでTx~Rx間の測定

平均値検波測定 of 課題

チャンバ一時定数を小さくするため電波吸収体を配置



電波吸収体なし

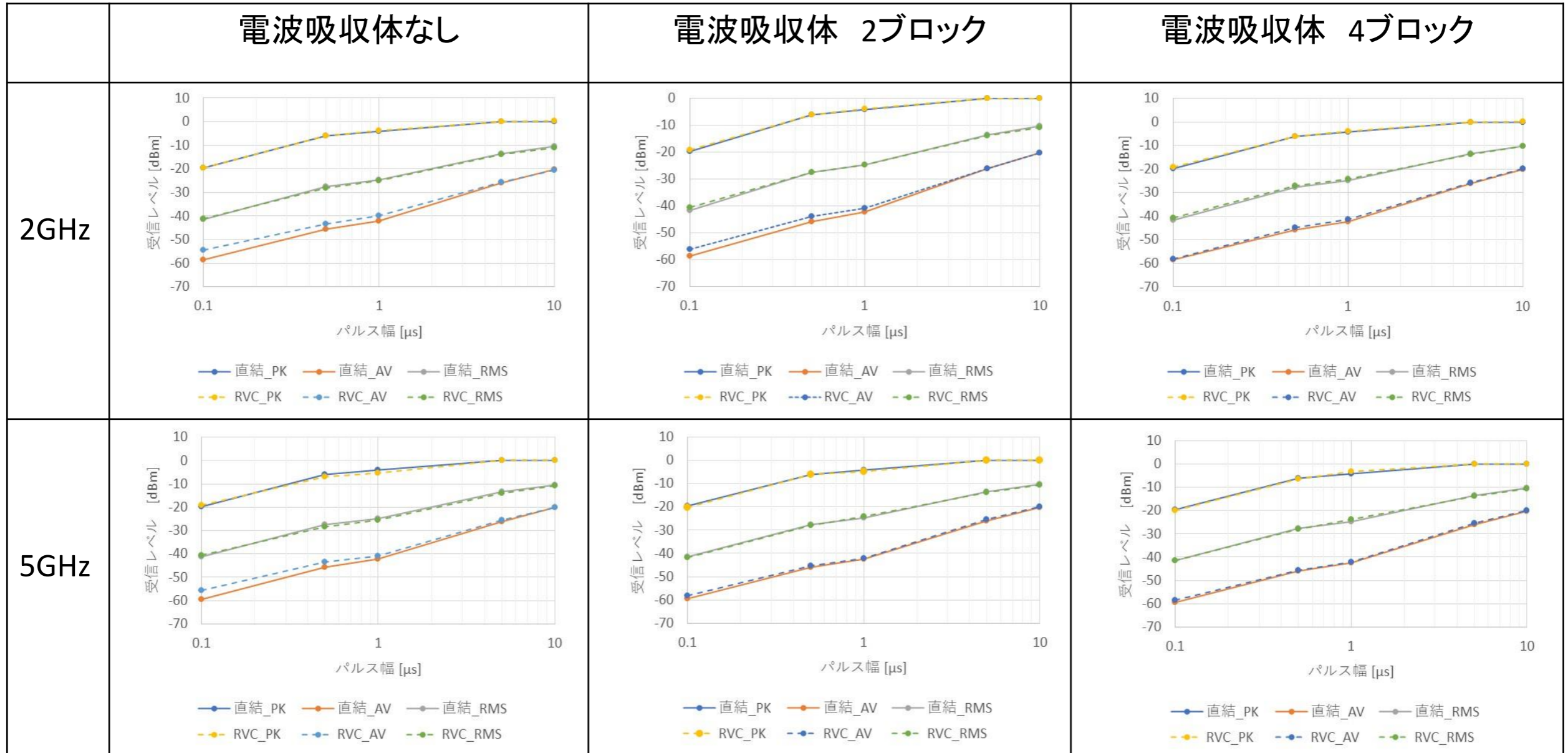


電波吸収体 2ブロック



電波吸収体 4ブロック

平均値検波測定の課題 測定結果

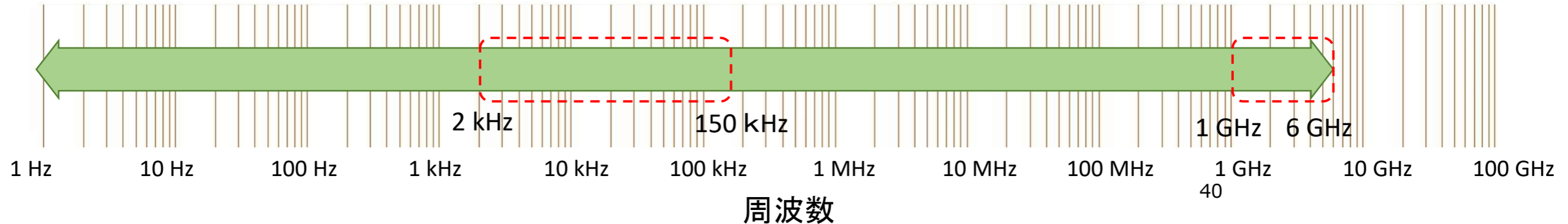


本日のアジェンダ

1. 自動車EMCと試験規格
2. 周波数の拡大と高周波帯での試験品質
3. リバブレーションチャンバーの要件とイミュニティ試験
4. リバブレーションチャンバーの放射エミッション測定への適用
5. まとめ

まとめ

自動車EMCの試験周波数



1. 低周波では、大電力装置の対策手法 . . . 必要性と環境要件の明確化
 2. 高周波では、試験品質の確保 . . . 現実的な試験法
 - リバブレーションチャンバーのイミュニティ試験適用(大型車載機器への適用の可能性)
 - リバブレーションチャンバーの放射エミッション測定の可能性
- 自動車EMC試験では、アンテナもEUTも固定またはそれに近い条件で実施される。
 - 実車はサイズが大きく、車載機器はハーネスを有するため現実的にはアンテナ位置の変更やEUTの回転は難しい。試験時間もかかる。
 - 測定周波数の拡大によって顕在化してきているため、試験品質確保には効率的で実行可能な試験法が望まれる。

ご清聴ありがとうございました

JQA 一般財団法人
日本品質保証機構