

ISO 11452-11 の概要 — 車載機器のイミュニティ試験 (リバブレーション・チャンバー)

株式会社 e・オートマ 佐藤智典

2025 年 9 月 29 日

目次

1	はじめに	1
2	共通事項 (ISO 11452-1)	2
2.1	電源	2
2.1.1	低圧 DC 電源	2
2.1.2	高圧 DC 電源 (ISO 11452-1:2015)	3
2.2	AN, AMN, AAN	3
2.2.1	AN (LV-AN)	3
2.2.2	HV-AN	4
2.2.3	AMN	5
2.2.4	AAN	5
2.3	ロード・シミュレータ	6
2.4	テスト・ハーネス	7
2.5	DUT の動作	7
2.6	試験信号の品質	7
2.7	試験信号の変調	7
2.8	ドウェル・タイム	8
2.9	周波数掃引ステップ	8
2.10	FPSC	8
2.10.1	ISO 11452-1:2005	9
2.10.2	ISO 11452-1/A1:2008, ISO 11452-1:2015	9
3	ISO 11452-11	10
3.1	リバブレーション・チャンバーの原理	10
3.2	特性評価	10
3.2.1	空のチャンバーでの評価	11
3.2.1.1	測定手続き	11
3.2.1.2	チャンバー・ゲイン G_{RC}	12
3.2.1.3	均一性要求: 標準偏差 $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z, \sigma$	12
3.2.1.4	受信アンテナ特性係数 A_{ACF}	13
3.2.1.5	最低使用可能周波数 F_{LUF}	13
3.2.2	最大チャンバー負荷係数 F_{MLF}	13
3.3	試験	14
3.3.1	DUT などの配置	14
3.3.2	チャンバー特性係数 A_{CCF}	16
3.3.3	チャンバー負荷係数 F_{CLF}	16
3.3.4	最小試験パルス幅 $T_{p,min}$	16
3.3.5	試験の実施	16
3.4	試験報告書	17
3.5	補足	17
3.5.1	主な記号	17
3.5.2	ALSE 法との比較	18
3.5.3	関連規格	18
4	参考資料	18

1 はじめに

本稿では、ISO 11452 シリーズで定められた車載機器のイミュニティ試験の方法のうち、ISO 11452-11^[1] で定められたリバブレーション・チャンバー (reverberation chamber)^{†1}法の概要を述べる。

この試験法は車両外の放射源からの高周波電磁界の車載機器への影響の評価を意図した試験法の 1 つで、評価対象の装置 (DUT) やそのハーネスをリバブレーション・チャンバー内に発生させられた電磁界に曝して影響を確認するものである。この規格を適用可能な周波数範囲の下限は規定されていないが、この試験法は高い周波数範囲での試験に適しており、この試験法が用いられる場合も低い周波数範囲での試験は他の試験法を用いて行なわれることが多いと思われる。

本稿では、この規格の本稿の執筆の時点での最新版である ISO 11452-11:2010 (ed. 1)^[1] について解説する。

なお、本稿はこの規格の内容全てをカバーするものではなく、また正確であるとも限らない。規格についての正確な情報は該当する規格そのもの^[1]を参照されたい。

^{†1} しばしば “RVC” と略される。

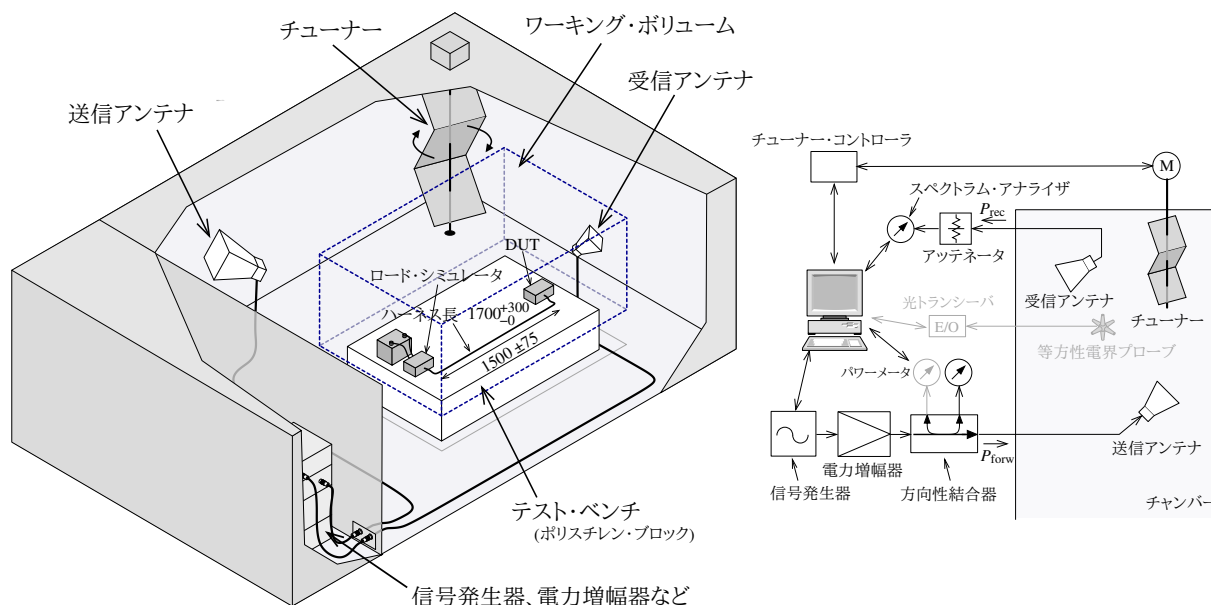


図 1: リバブレーション・チャンバーの概観

2 共通事項 (ISO 11452-1)

ISO 11452 シリーズの他の規格と共通する事項の多くは ISO 11452-1^[2] での規定が参照される。

この章では、ISO 11452-1:2005(+A1:2008)、及び ISO 11452-1:2015 の概要を述べる。

2.1 電源

電源に対する主な要求事項を以下の章で、またテスト・プランで電源電圧が指定されていない場合の電源電圧を表 1 に示す。

充電電源以外の高圧 (HV) DC^{†2} 電源についてはこの規格上の規定はなく、テスト・プランで規定することが必要となる。

2.1.1 低圧 DC 電源

低圧 (LV) DC^{†2} 電源は以下の条件を満たさなければならない:

- 内部インピーダンスは 0~400 Hz で $< 0.01 \Omega$;
- 無負荷から最大負荷 (突入電流を含む) で電圧が 1 V を超えて変動せず、100 μ s 以内に最大変動の 63 % を回復する;

^{†2} この規格では直流電源は 60 V 以上の場合に HV (高圧)、それを下回る場合に LV (低圧) として扱われる。

- リップル電圧は 0.2 V_{P-P} を超えず、その周波数は 400 Hz を超えない。

この電源としては通常は車両用のバッテリー (典型的には 12 V 鉛蓄電池) を用いることができる。バッテリーがリップルを発生することはないが、インピーダンスや電圧変動については定期的な確認が必要となるかも知れない。また、バッテリーと負荷との接続は太く短いワイヤで行なうべきであり、バッテリーの電圧は試験前と試験後に確認すべきである。

LV DC 電源は一般に感電の危険がないとみなすことができるが、短絡に伴う発火や火傷などの事故の可能性は考えられ、短絡の防止に注意を払うとともに、短絡時のリスクの低減のための処置 (例えばバッテリーの直近への適切な定格のヒューズの取り付け^{†3}など) を講じることが望ましいだろう。

バッテリーの電圧の維持のためにバッテリーと並列に電源装置を接続することもある^{†4}だろうが、この場合はリップルの確認も必要となるであろう。また、

^{†3} ワイヤに見合った溶断電流の適切なヒューズが取り付けられていれば短絡時もワイヤの被覆の溶融や発火が生じる前にヒューズが切れて電流が遮断される。

^{†4} インピーダンスなどの条件を満足できるのであればバッテリーなしで電源装置のみを用いることもできるかも知れない。だが、電源装置そのものの特性、また電源装置は離れた位置 (場合によってはシールド・ルームの外) に置いて比較的長いワイヤやフィルタを介して接続することになるであろうことを考えると、電源装置を単体で用いるのは難しそうである。電源装置の端子の位置でその特性を満足すれば規格の文面上の要求は満足すると言えるかも知れないものの、その場合も長いワイヤやフィルタを介して接続すればその実効的な特性は著しく損なわれ、電源のインピーダンスを低く抑えることが無意味となりそうである。

規格	低圧 (LV) DC 電源			充電電源	
	12 V 系	24 V 系	48 V 系	DC	AC
ISO 11452-1:2005(+A1:2008)	$13.5 \pm 0.5 \text{ V}$	$27 \pm 1 \text{ V}$	—	—	—
ISO 11452-1:2015	$13 \pm 1 \text{ V}$	$26 \pm 2 \text{ V}$	—	$U_N \pm 10 \%$	$U_N^{+10\%}_{-15\%}, f_N \pm 1 \%$

U_N : 公称電圧、 f_N : 公称周波数

表 1: 電源電圧

電源装置はそのような使い方に対応していない (異常動作や損傷の危険がある) ことも多いため、接続の前に電源装置がその使い方に対応していることを確認すべきである。また、バッテリーの使用上の条件^{†5}や充電状態となっている時の水素ガスの発生にも注意が必要となるかも知れない。

電源装置を用いる場合、電源装置が試験で印加される妨害の影響を受けないようにするため、電源装置はシールド・ルームの外に置き、シールド・ルームへの引き込みの箇所で適切にフィルタする (通常はシールド・ルームの壁に取り付けられた貫通フィルタを通す) ことも必要となりそうである。

2.1.2 高圧 DC 電源 (ISO 11452-1:2015)

高圧 (HV) DC^{†2} 電源の特性はテスト・プランで規定する。

実際の使用に際して車両上の HV バッテリーに接続される HV DC 電源ラインには試験に際しても車両の HV バッテリーを接続すべきである。あるいは、その代わりとなる適切な電源装置 (充電器や回生型のインバータに接続した場合のように充電状態となる場合がある、すなわち負荷側から電源への電流の逆流を生じる場合があるならばそれに対応したもの) を用いることもできる。

充電用 DC 電源ライン (実際の使用で急速充電器に接続されるような) には充電器かそれに相当する電源装置から給電することができるだろう。

外部の HV 電源装置は貫通フィルタを介して接続しなければならない。

HV 電源では発火や火傷などの事故の可能性に加えて感電に伴う直接的な危害のリスクも高まり、絶縁の維持 (適切な絶縁材の使用、電圧に応じた沿面

距離の維持など) や接近の防止 (例えば端子などの危険な箇所への接近を防ぐための適切なガードの使用など) にも相当の注意が必要となりそうである。

2.2 AN, AMN, AAN

ISO 11452-1:2015 では試験に際して電源などのインピーダンスを管理するためのデバイスとして表 2 に示すものが規定されている。

ISO 11452-1:2005(+A1:2008) はこのうち AN (LV-AN) のみを含む。

これらのデバイスはグラウンド・プレーン上に直接置き、その金属の筐体はグラウンド・プレーンとのあいだの直流抵抗が $2.5 \text{ m}\Omega$ 以下となるようにグラウンド・プレーンに接続する。また、これらのデバイスの測定ポートは全て 50Ω の終端器 (AN 内蔵のもの、あるいは外付けの同軸終端器) で終端する。

2.2.1 AN (LV-AN)

12 V や 24 V などの LV DC 電源に使用する AN (HV-AN との区別のために LV-AN と表記することもある) は、 $5 \mu\text{H}/50 \Omega$ AN、あるいは単に $5 \mu\text{H}$ AN と呼ばれるもので、図 2 に示すような構成の、測定ポートを 50Ω で終端した時に図 3 に示すようなインピーダンス特性を示すものである。

AN は実際の設置に際しての電源リターン線 (バッテリーのマイナス側に戻すための接続; LV-) の長さに応じて次のような形で用いられる:

- ローカルでの接地 — 電源リターン線が 200 mm 以下の場合^{†6}

AN を 1 台だけ用いて給電線 (バッテリーのプラス側への接続; LV+) のみを AN を介して接続

^{†5} 特に、充電電流がそのバッテリーの上限 (急速充電に対応していない鉛蓄電池では典型的にはバッテリー容量の値の $1/10$ の電流) を超えないように、また過充電としないように (鉛蓄電池はフロート充電が可能であるが、バッテリーの充電終止電圧よりも高い電圧を印加すると満充電となった後も充電が継続し、過充電状態となる) に注意が必要となるかも知れない。

^{†6} 小形のコンポーネントの配線でしばしば行なわれているように、電源リターンをワイヤで戻す代わりにコンポーネントの近くで車体に落とすような場合。

電源線用 AN, AMN	
LV DC 電源線	AN (LV-AN; $5 \mu\text{H} / 50 \Omega$) — ISO 11452-1 B.2.1 (図 2)
HV DC 電源線	HV-AN ($5 \mu\text{H} / 50 \Omega$) — ISO 11452-1 B.2.2 (図 2) [†]
AC 充電ライン	AMN ($50 \mu\text{H} / 50 \Omega$) — CISPR 16-1-2 (図 7) [†]
信号/制御/通信線用 AAN	
対称信号/制御ポート	ISO 11452-1 B.4.1 (図 9) [†]
電源線上の PLC	ISO 11452-1 B.4.2 (図 10) [†]
コントロール・パイロット上の PLC	ISO 11452-1 B.4.3 (図 11) [†]

[†] ISO 11452-1:2005(+A1:2008) には含まれない

表 2: AN, AMN, AAN (ISO 11452-1:2015)

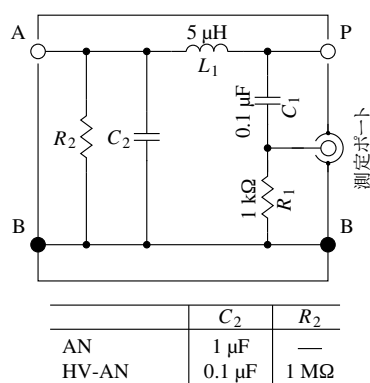


図 2: LV-AN, HV-AN の原理

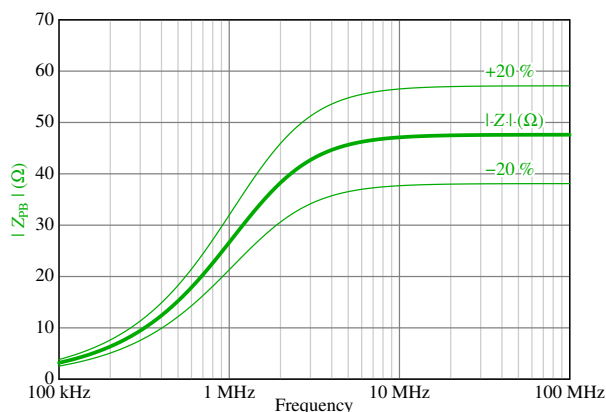


図 3: $5 \mu\text{H}/50 \Omega$ AN のインピーダンス Z_{PB} (測定ポートを 50Ω で終端、端子 A-B を短絡した状態での計算値)

し、電源リターン線 (バッテリーのマイナス側への接続; LV-) はグラウンド・プレーンを介して接続する (図 4)^{†7}

- 遠隔での接地 — 電源リターン線が 200 mm よりも長い場合

AN を 2 台用いて給電線 (LV+) と電源リター

^{†7} 電源のマイナス側が車体に接地されるものと仮定しており、電源のプラス側が接地される場合はそのように読み替える。

ン線 (LV-) の双方を AN を介して接続する (図 5)

低圧電源のマイナス側の線は、ローカルでの接地 (電源のマイナス側に AN を用いない; 図 4) の場合は勿論、遠隔での接地 (電源のマイナス側にも AN を用いる; 図 5) の場合にもその電源側でグラウンド・プレーンに接続する。

AN は電源のインピーダンスを管理する役割を持つが、そのインピーダンスは 100 MHz までしか規定されておらず、それよりも高い周波数ではインピーダンスは不明となる。このインピーダンスの違いが試験の結果に影響を与えるかも知れないが、その影響は §2.3 で述べるような方法で低減できるかも知れない。

2.2.2 HV-AN

HV DC 電源に用いられる HV-AN は LV DC 電源に用いられる LV-AN と基本回路 (図 2) やインピーダンス (図 3) の規定は同様だが、図 2 に示すように、電源入力側の定数として異なる値が示されている。^{†8}

HV-AN とテスト・ハーネスのあいだには、必要に応じて適切なインピーダンス整合回路網を入れることができる。HV DC 電源線はしばしばシールドされるため、HV-AN はケーブルのシールドを適切

^{†8} インピーダンス Z_{PB} は端子 A-B を (従って C_2 を) 短絡した状態で規定されているため、 C_2 の容量の違い (また、 C_2 があるかどうか) の影響を受けない。だが、 C_2 の 150 kHz におけるインピーダンスは $1 \mu\text{F}$ では約 1Ω 、 $0.1 \mu\text{F}$ では約 10Ω で、実際の使用時には $C_2 = 0.1 \mu\text{F}$ の HV-AN の端子 P-B 側から見たインピーダンスは電源入力側のインピーダンスの影響を有意に受けることが予期される。HV-AN の入力側の貫通フィルタを通して電源を接続すればこの影響はある程度緩和されるだろう。

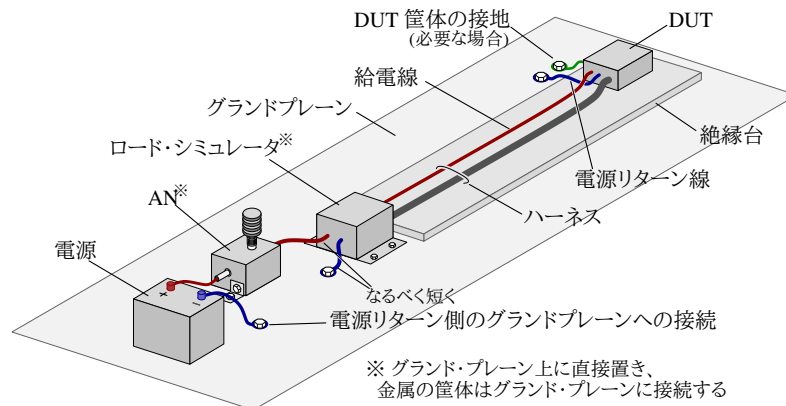


図 4: ローカルでの接地

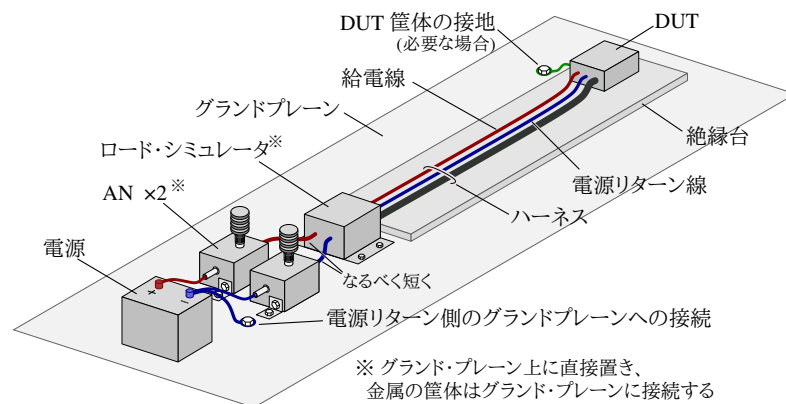


図 5: 遠隔での接地

に終端できるような構造となっているか、あるいはそのようなシールド・ケースに入れて使用されることが多い (図 6)。

CISPR 25:2021^[6] や ECE R10.06^{[3][4]} と異なり ISO 11452-1:2015 では充電用の DC 電源ラインのための DC-charging-AN の規定はなく、充電用の DC 電源ラインにも HV-AN を用いるように規定されている。

2.2.3 AMN

AMN (図 7) は商用電源に接続される一般の電気機器の電源ポート伝導エミッション測定で良く用いられるものと同様の $50 \mu\text{H} / 50 \Omega$ のものであり、AC 充電器の試験で交流電源ラインに用いられる。

2.2.4 AAN

AAN は充電時に車両外に接続される通信ポートに用いられることがある。

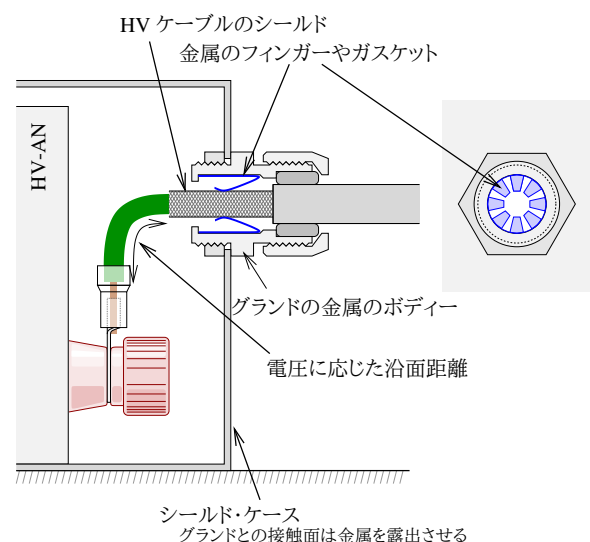
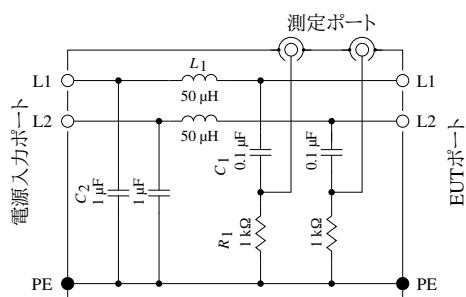
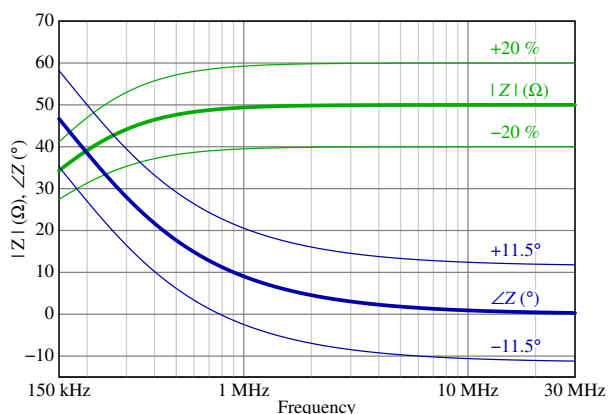
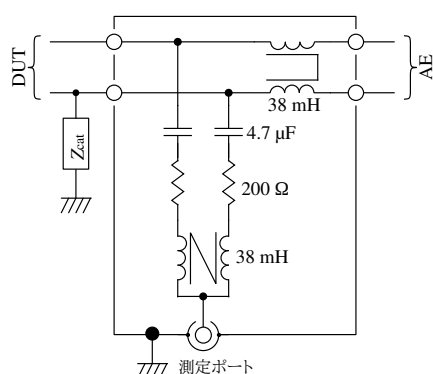


図 6: HV ケーブルの HV-AN への接続の例 — ケーブルのシールドをケーブル・グラウンドの金属のフィンガーなどを介してシールド・ケースに 360° 接続する

電源線上の PLC のための AAN (図 10) は AMN や HV-AN などと並列に接続することを意図して

図 7: AMN (50 μH / 50 Ω) の原理 — 単相電源用図 8: AMN (50 μH / 50 Ω) のインピーダンス

Z_{cat} : LCL が所定の値となるように平衡度を調整

図 9: 対称通信線のための AAN の例

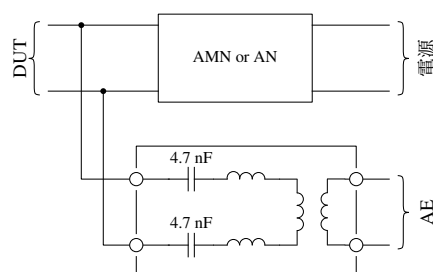


図 10: 電源線上の PLC のための AAN の例

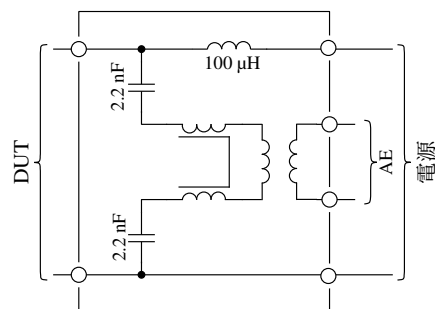


図 11: パイロット・ライン上の PLC のための AAN の例

が、その他の AAN (図 9, 図 11) は 150 Ω のインピーダンスを与えるようになっている。

対称通信線のための AAN (図 9) の Z_{cat} は、LCL (longitudinal conversion loss; 不平衡減衰量) を実際の使用時に接続される装置とケーブルに合わせるように調整する。

2.3 ロード・シミュレータ

試験に際して、テスト・ハーネスは適切なロード・シミュレータで終端する。このロード・シミュレータはグラウンド・プレーン上に直接置き、それが金属の筐体に入れている場合にはそれをグラウンド・プレーンに接続する。

グラウンド・プレーン上の適切な位置に置かれてテスト・ハーネスを終端するロード・シミュレータとは別の周辺装置が DUT (被試験装置; EUT と呼ばれることもある) の動作や監視のために必要となることもあるだろうが、そのような周辺装置は適切なロード・シミュレータを介して接続することができる。

ロード・シミュレータの先に他の周辺機器を接続する場合、ロード・シミュレータがその先の周辺機器とのあいだに適切な減結合を与えていれば、その先に接続される装置、それらの配置、またそれらを接続するケーブルやその引き回しが試験の結果にあまり影響しないようになるであろう。

そのような周辺装置をシールド・ルームの外に置く場合、導体をシールド・ルームの壁の貫通穴 (貫通スリーブ) を通して引き出すとシールド・ルームのシールド性が損なわれるため、光ファイバで接続する、シールド・ルームの壁に取り付けられた貫通フィルタを介して接続する、ケーブルを引き

おり、インピーダンスを制御する機能を持たない†9

†9 PLC の信号は AMN などを通過できず、この AAN は信

号を通すため代替の経路を提供する。

出した先の部屋もシールド・ルームとするなどの対応が必要となるかも知れない。

ISO 11452-1:2015 ではロード・シミュレータの設計は

- DUT に接続される I/O の負荷のタイプ (実際の、あるいは模擬された)
- DUT に接続されるそれぞれの I/O のコモン・モード・インピーダンス、及び/もしくはディファレンシャル・モード・インピーダンス
- 内部配線とレイアウト

に特に留意しなければならないと規定されており、ロード・シミュレータの設計の例も参考として示されている。^{†10}

電源のインピーダンスの管理はある程度は AN などで行なうこともできるものの、AN のインピーダンス (図 3) は 100 MHz までしか規定されておらず、一般にそれよりも高い周波数でのインピーダンスは不明となる。設計や実装を慎重に行なったロード・シミュレータを用い、ISO 11452-1:2015 のロード・シミュレータの設計の例などで示されているように DUT への電源もロード・シミュレータを介して給電するようにすれば、より高い周波数までのインピーダンスを AN の特性に頼らずに管理することが可能となるだろう。

2.4 テスト・ハーネス

テスト・ハーネスやその接続は実車を代表するものであるべきで、特にシールドされたハーネスの構造と接続は実車を代表するものでなければならない。またハーネスは適用する試験法の要求を満たす長さでなければならない。

2.5 DUT の動作

イミュニティ試験に際しては、評価の対象となる機能を動作させ、妨害の印加中や印加後にそれらの機能が正しく機能するかどうかを確認することが必要となる。

妨害の印加中にもボタンやタッチパネルなどが正しく機能するかどうかの確認が必要な場合は試験中

にボタンやタッチパネルなどの操作を行なうことも必要となるだろうが、このような操作を人の手で直接行なうことはできず、テスト・プランで要求される操作を電磁特性への影響が最小限となるようなアクチュエータ (例えば押しボタンを押すためのプラスチックのブロック、プラスチック・チューブで接続された空圧アクチュエータのような) を用いて行なうことが必要となるだろう。

例えば DUT の電磁妨害への反応の監視や信号の注入のために DUT から導体を引き出したいと思うこともあるかも知れないが、そのような導体は DUT の電磁妨害に対する挙動に影響を与える可能性があり、好ましくない。そのような接続は光ファイバや高抵抗リードを用いることで悪影響なしに、あるいは最小限の影響で行なうことができるかも知れない。

2.6 試験信号の品質

電力増幅器の出力の 5 次までの高調波歪みは最大の試験レベルで基本波の -12 dB 以下 (1 GHz 以上では -6 dB 以下) でなければならない。

電力増幅器やその出力の測定手段 (通常は方向性結合器とパワーメータ) が試験で使用する振幅の範囲でリニアリティを維持していることも重要となるだろう。

2.7 試験信号の変調

ISO 11452-1:2015 では以下の変調が規定されている (図 12):

- 無変調 (CW)
一定振幅の、単一周波数の高周波 (連続波)

- 振幅変調 (AM)

AM 放送のような音声周波で振幅変調された送信を模擬する、変調周波数 1 kHz、変調度 80 % の振幅変調

- パルス変調 1 (PM 1, PM)

GSM の TDMA (時分割多元接続) の送信を模擬する、 $t_{on} = 577 \mu s$ 、周期 = $4\,600 \mu s$ (繰り返し周波数 約 217 Hz、デューティー 1/8) の間欠的な出力

^{†10} ロード・シミュレータについては [7] で解説している。

- パルス変調 2 (PM 2)

レーダー・パルスを模擬する $t_{on} = 3 \mu s$ 、周期 = $3\ 333 \mu s$ (繰り返し周波数 300 Hz、デューティー 約 1/1000) の間欠的な出力

(ISO 11452-1:2005(+A1:2008) には含まれない)

それぞれの変調は以下の周波数範囲での使用が想定されているが、試験で実際に適用すべき変調はこの試験法を参照した規格で、あるいはテスト・プランで規定されるだろう:

- CW: 15 Hz～18 GHz
- AM: 10 kHz～800 MHz
- PM 1: 800 MHz～1.2 GHz, 1.4～2.7 GHz
(ISO 11452-1:2005(+A1:2008) では 800 MHz～18 GHz)
- PM 2: 1.2～1.4 GHz, 2.7～18 GHz
(ISO 11452-1:2005(+A1:2008) には含まれない)

2.8 ドウエル・タイム

試験に際しては、それぞれの周波数の妨害をある時間づつ印加し、DUT^{†11}の挙動を確認する。この時間 (ドウエル・タイム、滞在時間) の最小値は ISO 11452-1 では 1 秒以上と規定されているが、実際の時間はそれぞれの周波数の妨害に対する DUT の応答を確実に確認できるように DUT の特性や動作条件に応じて決め、テスト・プランで規定することが必要となるだろう。

DUT が間欠的に動く機能を持つ場合 (例えば通信やセンサの読み込みを 30 秒毎に行なっている場合のような) や反応に遅れがある場合 (例えばセンサ入力が時定数 10 秒のフィルタに通されている場合のような) には、ドウエル・タイムをかなり長くすることが必要となるかも知れない。これは試験時間を長くするので、特に予備試験の段階では、動作周期を短くし、あるいは応答時間を短くした試験用のサンプルを用意することが助けとなるかも知れない。

^{†11} device under test (被試験装置)。EUT (equipment under test) と呼ばれることもある。

2.9 周波数掃引ステップ

試験に際しては、必要な周波数範囲内で周波数を変えながら、それぞれの周波数の妨害を印加する。周波数の変え方には一定の周波数間隔で上げていく方法 (リニア・ステップ) と一定の比率で上げていく方法 (対数ステップ) があり、最大のステップ幅は表 3 の通りとなる。

周波数帯	リニア ステップ	対数 ステップ
15 Hz～100 Hz [†]	10 Hz	10 %
100 Hz～1 kHz [†]	100 Hz	10 %
1 kHz～10 kHz [†]	1 kHz	10 %
10 kHz～100 kHz	10 kHz	10 %
100 kHz～1 MHz	100 kHz	10 %
1 MHz～10 MHz	1 MHz	10 %
10 MHz～200 MHz	5 MHz	5 %
200 MHz～400 MHz	10 MHz	5 %
400 MHz～1 GHz	20 MHz	2 %
1 GHz～18 GHz	40 MHz	2 %

[†] ISO 11452-1:2005(+A1:2008) には含まれない

表 3: 周波数掃引ステップ (ISO 11452-1:2015)

試験で適用すべき掃引の方法 (リニアか対数か) やステップ幅はテスト・プランで規定することが必要となるだろう。

2.10 FPSC

ISO 11452-1 ではイミュニティ評価に関連して FPSC (functional performance status classification) と呼ばれる枠組みを定めている。

FPSC は試験厳しさレベルとその妨害の性能への影響に関する区分との組み合わせとなるが、性能への影響に関する区分は規格の版によって相違がある。

この枠組みを用いる場合、それぞれの試験についてどの試験レベルでどの機能が Class A～E、あるいは Status I～IV のいずれを満足する必要があるか、また Class A～E や Status I～IV がそれぞれの機能が具体的にどのような状態となることを意味するのかを試験に先立って規定することが必要となるだろう。^{†12}

^{†12} ここで示されているものは「設計通り」や「正常動作」などの表現を含んでいるが、この枠組みに従って判定を行なうためには少なくとも何が「設計通り」や「正常動作」なのかを明確にすることが必要となるだろう。

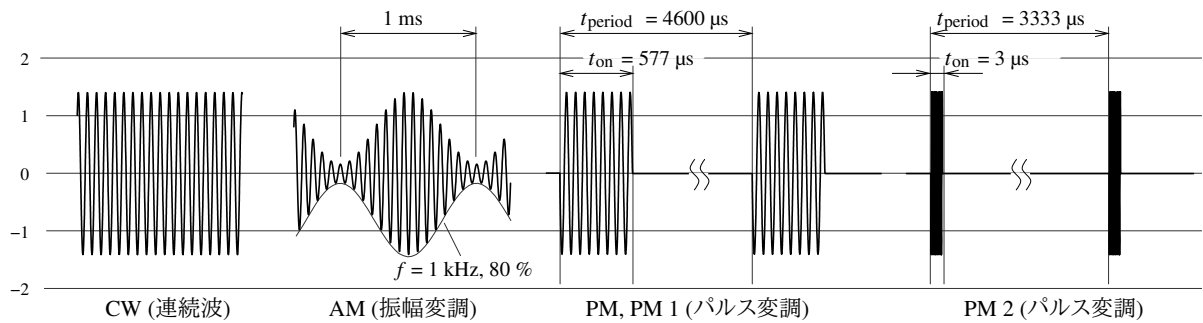


図 12: 変調

どの機能がどの判定基準に適合しなければならないかは、適用する規格、そのコンポーネントの機能や用途、そしてコンポーネントの製造業者や納入先の判断などに依存する。一般には、安全に関する機能についてはどの試験レベルでも危険側の誤動作は許容されないであろうが、高い試験レベルでの安全側の誤動作は許容されるかも知れない。また、安全に関係しない機能については、機能の劣化や、場合によっては機能の完全な喪失さえ許容されるかも知れない。

試験に際しては、評価が必要な機能、動作条件、具体的な判定基準などを事前に同定し、テスト・プランに記載するとともに、例えば監視機器、信号源、試験用プログラムなどが必要であればその準備を行なうべきである。安全に関する機能については、特に慎重な検討と準備が必要である。

2.10.1 ISO 11452-1:2005

ISO 11452-1:2005 では性能への影響に関する区分は functional status classification と呼ばれており、これは次のようなものとなる:

- Class A: 妨害の印加中とその後、デバイスやシステムのすべての機能が設計通りに動作する。
- Class B: 妨害の印加中、デバイスやシステムのすべての機能が設計通りに動作する。だが、その1つ以上が規定された許容幅を超えても良い。妨害が止められた後、すべての機能は自動的に通常の限界内に戻る。メモリ機能は Class A のままでなければならない。
- Class C: 妨害の印加中、デバイスやシステムの1つ以上の機能が設計通りに動作しないが、妨

害が止められた後、すべての機能は自動的に通常の限界内に戻る。

- Class D: 妨害の印加中、デバイスやシステムの1つ以上の機能が設計通りに動作せず、妨害が止められ、デバイスやシステムが単純な「オペレータ/使用」アクションによってリセットされるまで、通常の限界内に戻らない。
- Class E: 妨害の印加中とその後、デバイスやシステムの1つ以上の機能が設計通りに動作せず、デバイスやシステムの修理か交換なしでは正しい動作に戻らない。

2.10.2 ISO 11452-1/A1:2008, ISO 11452-1:2015

ISO 11452-1:2005+A1:2008 や ISO 11452-1:2015 では性能への影響に関する区分は function performance status と呼ばれており、これは次のようなものとなる:

- Status I: 試験中、及び試験後、機能が設計通りに動作する。
- Status II: 試験中は機能が設計通りに動作しないが、試験後は自動的に正常動作に戻る。
- Status III: 試験中は機能が設計通りに動作せず、妨害が止められた後での DUT のオフ/オンやイグニッション・スイッチの操作のような運転手や乗客の簡単な関与なしでは正常動作に戻らない。
- Status IV: 試験中は機能が設計通りに動作せず、例えばバッテリーや給電線を外して再接続するようなより広範な関与なしでは正常動作に戻る。

らない。試験の結果として、機能が恒久的な損傷を被ってはならない。

3 ISO 11452-11

3.1 リバブレーション・チャンバーの原理

本稿で述べるような試験法で用いられるチャンバー (図 1) は、それ自身は単なる高 Q のシールド・ルームである。

このようなチャンバーの中で電磁波を放射した時、チャンバー内の電磁界は著しく不均一となり、強い電磁界が生じる場所が生じる一方、非常に弱い電磁界しか生じない場所も生じることが予期される。

この試験で用いられるようなリバブレーション・チャンバーは、チャンバー内に設置された 1 つ以上のチューナー (反射性かつ可動の構造物で、スターラー、パドル・ホイールなどとも呼ばれる)^{†13}を用いてチャンバー内の電磁界のパターンを変化させ^{†14}、チャンバー内の広い空間で様々な方向からの、また様々な偏波の、統計的に均一かつ統計的に等方的な電磁界を発生させようとするものとなる。

他の特性との兼ね合いからゲインを抑えることが必要となるかも知れないものの、このようなチャンバーは相当のゲインも与え、比較的低い電力で広い空間に所望の電磁界を発生させられることも期待できる。^{†15}

この規格では適用可能な周波数範囲の下限もチャンバーやチューナーの形状や大きさも規定されておらず、規格上は任意の周波数からこの試験法を用いることができる。だが、この試験法の低い周波数での有効性は DUT に接続されるハーネスの長さ (標準的には 1700^{+300}_{-0} mm) によって制限されるであろうだけでなく、リバブレーション・チャンバーの原

理上、低い周波数での使用のためには大きなチャンバーと大きなチューナーが必要となる^{†16} であろうことから、この試験法は高い周波数範囲での使用に特に適したものとなるだろう。

リバブレーション・チャンバーには連続的に回転するスターラーを用いるものもあるが、この規格ではそれぞれの試験周波数でチューナーを段階的に回転させそれぞれの位置にドウェル・タイムのあいだ留めて DUT への影響を観測する方法が用いられる。^{†17}

3.2 特性評価

リバブレーション・チャンバーの特性評価は以下の章で示すように行なう。

評価周波数 (周波数帯毎の周波数ステップ)、及びチューナーの回転のステップ数は、表 4 で示した規格の規定を満足するように決める。

但し、均一性要求を満足させるため、チューナーの回転のステップ数は表 4 で示した値よりも大きくすることが必要となるかも知れない。^{†18}

ワーキング・ボリウムは、そのチャンバーで試験を行なうことが想定される試験セットアップ全体が収まるように、またできれば床、壁、天井、チューナーなどの構造物から最低特性評価周波数における $\lambda/4$ よりも離すように設定する。

^{†13} 機械的なチューナー以外が用いられることもあるが、ここでは機械的なチューナーを用いたリバブレーション・チャンバーのみを考える。機械的なチューナーも形状は任意であって様々な形状のものが用いられており、回転以外の動き、例えば壁をうねらすような方法が用いられることもある。この種の事項については例えば [11] で見ることができる。本稿の図で示したチューナーは “Z-folded” として知られているものである。

^{†14} チューナーの回転による電磁界の分布の変化のイメージは、例えば <https://www.youtube.com/watch?v=jnZ-t3mUq2E> (Electric field in a reverberation chamber computed with a moving stirrer, Emmanuel Amador, 2015) で見ることができる。

^{†15} 例えば [9] の Figure 5.3-1 では $47' \times 23' \times 9.5'$ (約 $14 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 3 \text{ m}$) のチャンバーで 200~1000 MHz 程度の周波数範囲で 30 W 程度以下の電力で 200 V/m を得られたことが示されている。

^{†16} 少なくともチャンバーとチューナーの双方が試験したい周波数における波長よりも電気的に大きいことが必要となるだろう。チャンバーの大きさについては、内寸 $a \times b \times d$ の直方体のキャパシティの共振周波数は $f_{mnp} = (c_0/2) \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2 + (p/d)^2}$ で、 $a < b < d$ として $f_{011} = (c_0/2) \sqrt{1/b^2 + 1/d^2}$ 、 $5 f_{011} \leq F_{LUF}$ (ここで F_{LUF} はチャンバーの最低使用可能周波数で、チャンバーの特性評価 (§3.2.1.5) で確定される) と仮定すると、例えば $b = 3 \text{ m}$ 、 $d = 4 \text{ m}$ で $300 \text{ MHz} \leq f_{LUF}$ 、また $b = 9 \text{ m}$ 、 $d = 15 \text{ m}$ で $100 \text{ MHz} \leq f_{LUF}$ となる。^[12]

^{†17} 前者のようなモードのリバブレーション・チャンバーは mode stirred chamber (モード攪拌チャンバー) とも、またそのチューナーはスターラー (攪拌子) とも呼ばれる。また、後者のようなモードのチャンバーは mode tuned chamber (モード同調チャンバー) とも呼ばれる。勿論、同一のチャンバーを双方のモードで使用できるようにすることも可能である。モード攪拌とモード同調での大きな違いは、モード同調での動作のためにはチューナーをそれぞれの角度に合わせて静止させることが必要となることである。

^{†18} このステップ数を大きくすれば均一性の評価結果は良くなる可能性がある。だが、試験 (§3.3.5) の際のチューナーの回転のステップ数は特性評価の際のこのステップ数と同一かそれ以上 (おそらく大抵は同一) とする必要がある、従ってこのステップ数は試験時間に直接影響することにも注意すべきであろう。

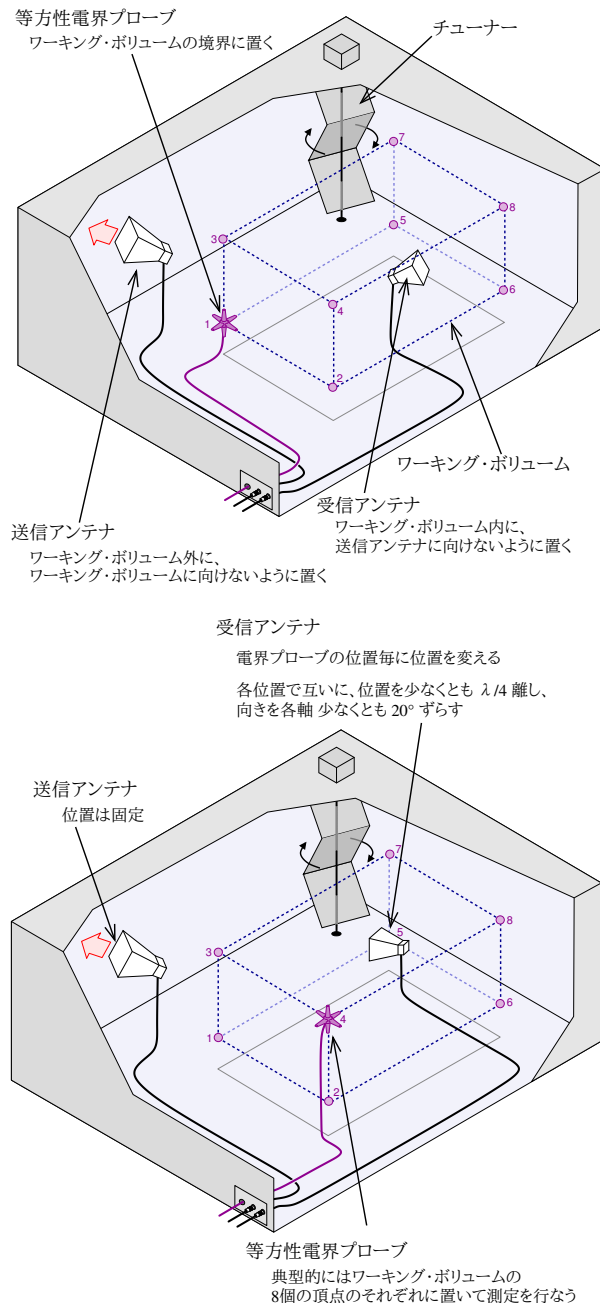


図 13: 特性評価のセットアップのイメージ (§3.2.1.1)

3.2.1 空のチャンバーでの評価

3.2.1.1 測定手続き

図 13に示すように、

1. ワーキング・ボリウムを空の状態とする。
2. 送信アンテナをワーキング・ボリウムの外の選択された位置に配置する。

送信アンテナはチャンバーの壁から最低特性評価周波数における $\lambda/4$ よりも離すべきである。

また、送信アンテナはワーキング・ボリウムを直接照射すべきではなく、可能であればチャンバーの角かチューナーに向けるべきである。^{†19}

3. N 箇所 (少なくとも 8 箇所、通常は直方体のワーキング・ボリウムの各頂点) の電界プローブ位置それぞれについて、

- (a) 等方性電界プローブをワーキング・ボリウムの境界の選択された位置 (位置 i) に置く。

プローブの位置はワーキング・ボリウムを囲まなければならない、通常は直方体のワーキング・ボリウムの頂点とする。

ワーキング・ボリウムを囲む面はチャンバーの内面、送信アンテナ、あるいはチューナーに最低特性評価周波数における $\lambda/4$ よりも近付かないことが推奨される。

- (b) 受信アンテナをワーキング・ボリウム内に置く。受信アンテナはポリスチレンの台の上に置くべきである。

受信アンテナを置く位置は任意だが、プローブの位置を変える度に変え、それぞれの位置が他の位置から最低特性評価周波数における $\lambda/4$ よりも離れるようにすべきである。

また、受信アンテナは、送信アンテナやワーキング・ボリウムの中心方向に向けることは避けながら、それぞれの位置で異なる (それぞれの軸について少なくとも 20° 異なる) 方向に向けるべきである。^{†19}

- (c) 各評価周波数について、^{†20}

- i. 送信アンテナへの進行波電力 P_{Forw} を受信アンテナでの受信電力 P_{Rec} が十分に高くなるように調整する。
- ii. チューナーをあらかじめ決めたステップで回転させ、その各ステップで、送信アンテナへの進行波電力 P_{Forw} 、受信アンテナでの受信電力 P_{Rec} 、及

^{†19} [13] では送信アンテナの位置や向きはあまり重要ではないことを示唆するデータが示されている。また、偏波はランダム化されるので、アンテナの偏波面は任意の方向に向けることができる。

^{†20} ここで現れる記号の多くは、インデックス i が付けられていないものを含めて、電界プローブ位置 i におけるその評価周波数に対する、あるいはそれに加えてそのチューナー位置に対する値である。例えば P_{Rec} は後者、 $P_{\text{Rec,max}}$ は前者となる。

び電界プローブの各軸での電界強度 E_X, E_Y, E_Z を記録する。

- iii. チューナーの各ステップで記録されたデータから、チューナーの1回転のあいだの以下の値を求める：

- 最大受信電力 $P_{\text{Rec,max}}$
- 平均受信電力 $P_{\text{Rec,avg}}$
- 電界プローブの各軸での最大電界強度 $E_{X,\text{max}}, E_{Y,\text{max}}, E_{Z,\text{max}}$
- 平均進行波電力 $P_{\text{Forw,avg}}$

- iv. それぞれの位置で電界プローブの各軸で測定された最大値 $E_{X,\text{max}}, E_{Y,\text{max}}, E_{Z,\text{max}}$ を送信アンテナへの平均進行波電力 $P_{\text{Forw,avg}}$ の平方根で正規化し、各軸の電界の測定値の正規化された最大値 $e_{X,i}, e_{Y,i}, e_{Z,i}$ を得る：

$$e_{X,i} = \frac{E_{X,\text{max}}}{\sqrt{P_{\text{Forw,avg}}}}$$

$$e_{Y,i} = \frac{E_{Y,\text{max}}}{\sqrt{P_{\text{Forw,avg}}}}$$

$$e_{Z,i} = \frac{E_{Z,\text{max}}}{\sqrt{P_{\text{Forw,avg}}}}$$

- v. 平均受信電力 $P_{\text{Rec,avg}}$ の平均進行波電力 $P_{\text{Forw,avg}}$ に対する割合としてその受信アンテナ位置におけるチャンバー特性係数 (chamber characterization factor) $A_{\text{CCF},i}$ を求める：

$$A_{\text{CCF},i} = \frac{P_{\text{Rec,avg}}}{P_{\text{Forw,avg}}}$$

このチャンバー特性係数 $A_{\text{CCF},i}$ はこの後の手順 (§3.2.1.4) でその平均である受信アンテナ特性係数 A_{ACF} の算出に用いられる。

3.2.1.2 チャンバー・ゲイン G_{RC}

それぞれの評価周波数について、 N 箇所 (通常は $N = 8$) のプローブ位置全ての各軸の電界の測定値の正規化された最大値 $e_{X,i}, e_{Y,i}, e_{Z,i}$ の平均値、 G_{RC} を求める。

$$G_{\text{RC}} = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^N (e_{X,i} + e_{Y,i} + e_{Z,i})$$

この G_{RC} はチャンバー・ゲインで、所望の試験レベルのために必要な進行波電力の計算に用いられる。

3.2.1.3 均一性要求：標準偏差 $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z, \sigma$

1. それぞれの周波数、またプローブの各軸について、 N 箇所 (通常は $N = 8$) のプローブ位置における各軸の電界の測定値の正規化された最大値 $e_{X,i}, e_{Y,i}, e_{Z,i}$ の平均 $e_{X,\text{avg}}, e_{Y,\text{avg}}, e_{Z,\text{avg}}$ を求める：

$$e_{X,\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_{X,i}$$

$$e_{Y,\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_{Y,i}$$

$$e_{Z,\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_{Z,i}$$

2. 各軸の電界の測定値の正規化された最大値 $e_{X,i}, e_{Y,i}, e_{Z,i}$ の標準偏差 $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ は以下の式で求められるものとする：

$$\sigma_X = 1.06 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (e_{X,i} - e_{X,\text{avg}})^2}{N - 1}}$$

$$\sigma_Y = 1.06 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (e_{Y,i} - e_{Y,\text{avg}})^2}{N - 1}}$$

$$\sigma_Z = 1.06 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (e_{Z,i} - e_{Z,\text{avg}})^2}{N - 1}}$$

3. また、それら全ての標準偏差 σ は：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left((e_{X,i} - e_{X,\text{avg}})^2 + (e_{Y,i} - e_{Y,\text{avg}})^2 + (e_{Z,i} - e_{Z,\text{avg}})^2 \right)}{3N - 1}}$$

4. 平均値に対するこれらの標準偏差の対数での表現 σ_X (dB), σ_Y (dB), σ_Z (dB), σ (dB) は：^{†21}

$$\sigma_X \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_X + e_{X,\text{avg}}}{e_{X,\text{avg}}} \right)$$

$$\sigma_Y \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_Y + e_{Y,\text{avg}}}{e_{Y,\text{avg}}} \right)$$

^{†21} [1] では単に $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z, \sigma$ となっている。

周波数範囲	特性評価と試験のための 推奨チューナー位置数	特性評価と試験のための 最小チューナー位置数	特性評価のための 最小周波数ステップ数
$f_S \sim 3f_S$	50	12	20
$3f_{LUF} \sim 6f_{LUF}$	18	6	15
$6f_{LUF} \sim 10f_{LUF}$	12	6	10
$> 10f_{LUF}$	12	6	20 per decade

f_S : チャンバーの最低特性評価周波数、 f_{LUF} : チャンバーの最低使用可能周波数

表 4: チューナー位置と周波数ステップの要求 (ISO 11452-11 Table B.1)

$$\sigma_Z(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_Z + e_{Z,\text{avg}}}{e_{Z,\text{avg}}} \right)$$

$$\sigma(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma + e_{\text{avg}}}{e_{\text{avg}}} \right)$$

5. $\sigma_X(\text{dB})$ 、 $\sigma_Y(\text{dB})$ 、 $\sigma_Z(\text{dB})$ 、及び $\sigma(\text{dB})$ が 図 14 に図示する許容差の範囲内にあればそのチャンバーは均一性要求を満たすとみなされる。

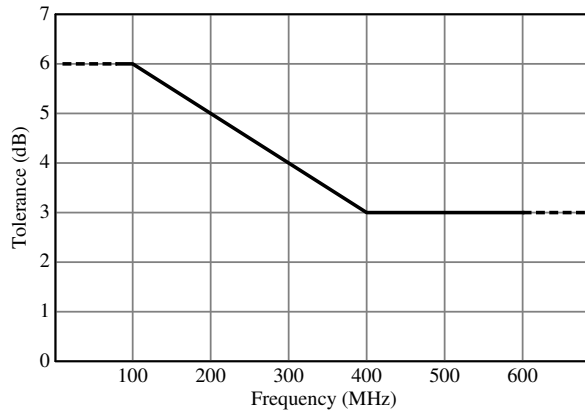


図 14: 標準偏差要求 (ISO 11452-11 Table B.2 より)

3.2.1.4 受信アンテナ特性係数 A_{ACF}

それぞれの周波数における受信アンテナ特性係数 (receiving antenna characterization factor) A_{ACF} は各受信アンテナ位置におけるチャンバー特性係数 $A_{CCF,i}$ (§3.2.1.1 3(c)v) の平均値として求められる:

$$A_{ACF} = A_{CCF,i,\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{CCF,i}$$

3.2.1.5 最低使用可能周波数 f_{LUF}

均一性要求 (§3.2.1.3) を満たす最低周波数がそのチャンバーの最低使用可能周波数 (lowest usable frequency) f_{LUF} となる。

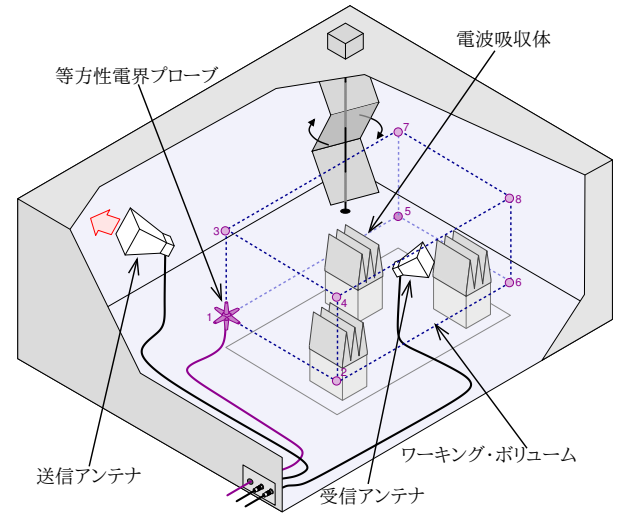


図 15: 最大チャンバー負荷係数 F_{MLF} の評価のためのセットアップのイメージ (§3.2.2)

3.2.2 最大チャンバー負荷係数 F_{MLF}

ここまでの評価は通常はチャンバーを空にした状態で行なうが、試験時にはチャンバー内には試験対象のシステムやテーブルなどが置かれ、それらが与える電磁的な負荷がフィールド均一性を損なう可能性がある。

ここでチャンバー内に負荷 (電波吸収体) を置いて求められる最大チャンバー負荷係数 F_{MLF} はフィールド均一性を損なわずにチャンバー内に置くことができると確認された電磁的な負荷の限界で、これは試験の前に求めるチャンバー負荷係数 F_{CLF} (§3.3.3) の上限を定めるものとなる。

最大チャンバー負荷係数 F_{MLF} は次のように測定する:

- 図 15 にイメージを示すように、ワーキング・ボリューム内に負荷として適量の (試験の際にチャンバー内に置かれるものが与えるであろうものよりも多くの、あるいは均一性要求を損なわ

いであろう範囲でなるべく多くの) 電波吸収体を置くことを除き、§3.2.1.1での配置と同様とする。

電界プローブや受信アンテナは電波吸収体に最低特性評価周波数における $\lambda/4$ よりも近付かないようにする。

2. 均一性が維持されているかどうかの確認のため、§3.2.1.1から §3.2.1.4で触れた測定と計算を繰り返す。
3. 電波吸収体を置いた状態での評価の結果が均一性要求 (§3.2.1.3) を満たさなかった場合、電波吸収体の量を減らして上記の作業を繰り返す。
4. 電波吸収体を置いた状態での評価の結果が均一性要求 (§3.2.1.3) を満たしたならば、§3.2.1.4で求めたチャンバーが空の状態での受信アンテナ特性係数 A_{ACF} を $A_{ACF,empty}$ 、電波吸収体を置いた状態での A_{ACF} を $A_{ACF,loaded}$ として、次の式から 最大チャンバー負荷係数 (maximum chamber loading factor) F_{MLF} を求める:

$$F_{MLF} = \frac{A_{ACF,empty}}{A_{ACF,loaded}}$$

3.3 試験

3.3.1 DUT などの配置

図 16と図 17に示すように、

- 送信アンテナはチャンバーの特性評価 (§3.2) の際と同じ位置に置く。
- 受信アンテナは、ワーキング・ボリウム内の任意の位置に、送信アンテナやワーキング・ボリウムの中心に向けることは避けて置く。受信アンテナはポリスチレンの台の上に置くべきである。

そして、

- DUT システムはワーキング・ボリウム内に配置する。
- テスト・ベンチは最低試験周波数における $\lambda/4$

以上の高さ^{†22}のポリスチレンのブロックとする。

- DUT の外装がその実際の使用で車両の金属の構造物に接地されない場合、グランドプレーンを用いずに DUT をテスト・ベンチ上に直接置く (図 16) か、あるいはグランドプレーンを用いて DUT をグランドプレーンから絶縁して置く (図 17)。

DUT の外装が車両の金属の構造物に接地される場合、グランドプレーンを用いて DUT の外装をグランドプレーンに接地すべきである (図 17)。

- グランドプレーンを用いる場合、グランドプレーンは:
 - 銅、黄銅、あるいは鍍金鋼板製の、DUT システム全体を置ける大きさのものとする
 - ワーキング・ボリウム内に、壁やチューナーから最低試験周波数における $\lambda/4$ よりも離して配置する^{†22}
 - 0.3 m 以下の間隔で取り付けられたボンディング・ストラップで、直流抵抗が 2.5 mΩ 以下となるようにチャンバーに接地する
- バッテリーの電圧の維持のために電源装置を用いる場合、電源装置はチャンバー外に置き、フィルタを介してチャンバーに引き込む。
フィルタからバッテリーまでの電源線はシールドされていても良い。
電源線はチャンバーの床や壁に沿って引き回すべきである。
- 低圧直流電源 (例えば DC 12 V) は、グランドプレーンを用いる場合は車両での意図された設置に応じて 1 つか 2 つの AN を介して、グランドプレーンを用いない場合は AN を介さずに接続する。
- テスト・プランで他の長さが規定されない限り、 1700^{+300}_{-0} mm のハーネスを用いる。

^{†22} 最低特性評価周波数 ≤ 最低使用可能周波数 ≤ 最低試験周波数 であり、ワーキング・ボリウムはチャンバーの床や壁、チューナーなどから最低特性評価周波数における $\lambda/4$ よりも離すことが推奨される (§3.2) ので、この推奨に従っていれば自ずとそうすることになるであろう。

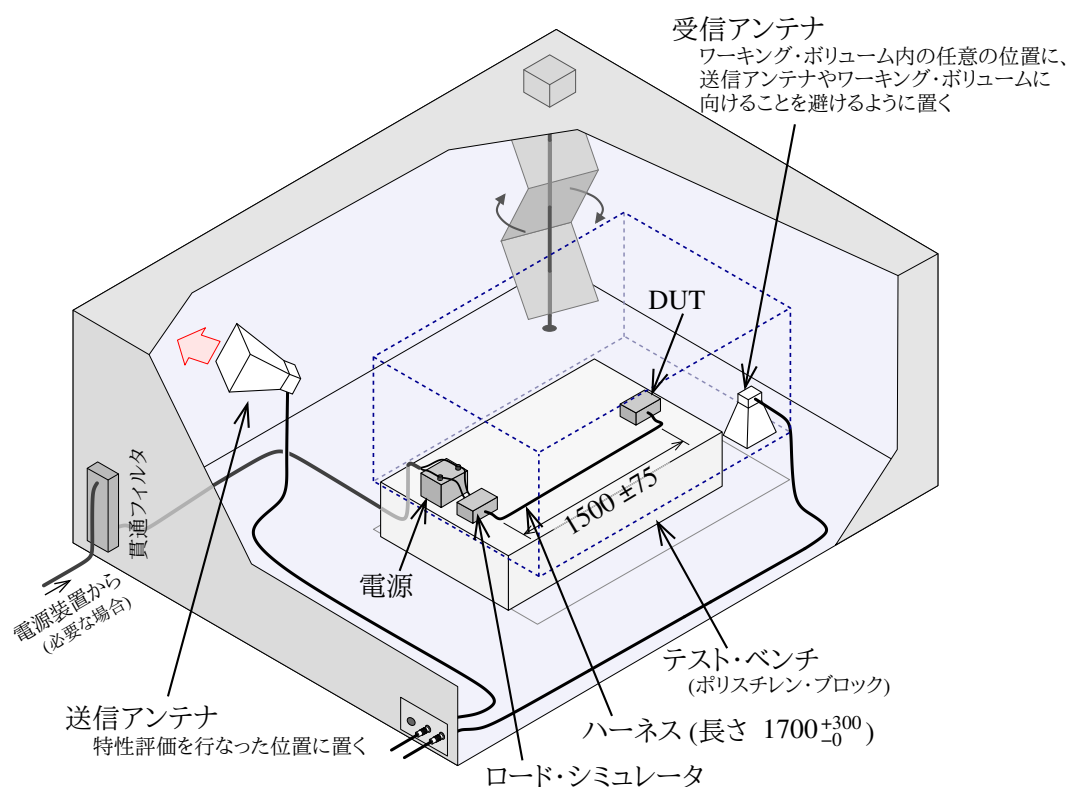


図 16: グランドプレーンなしでの試験セットアップのイメージ (§3.3.1)

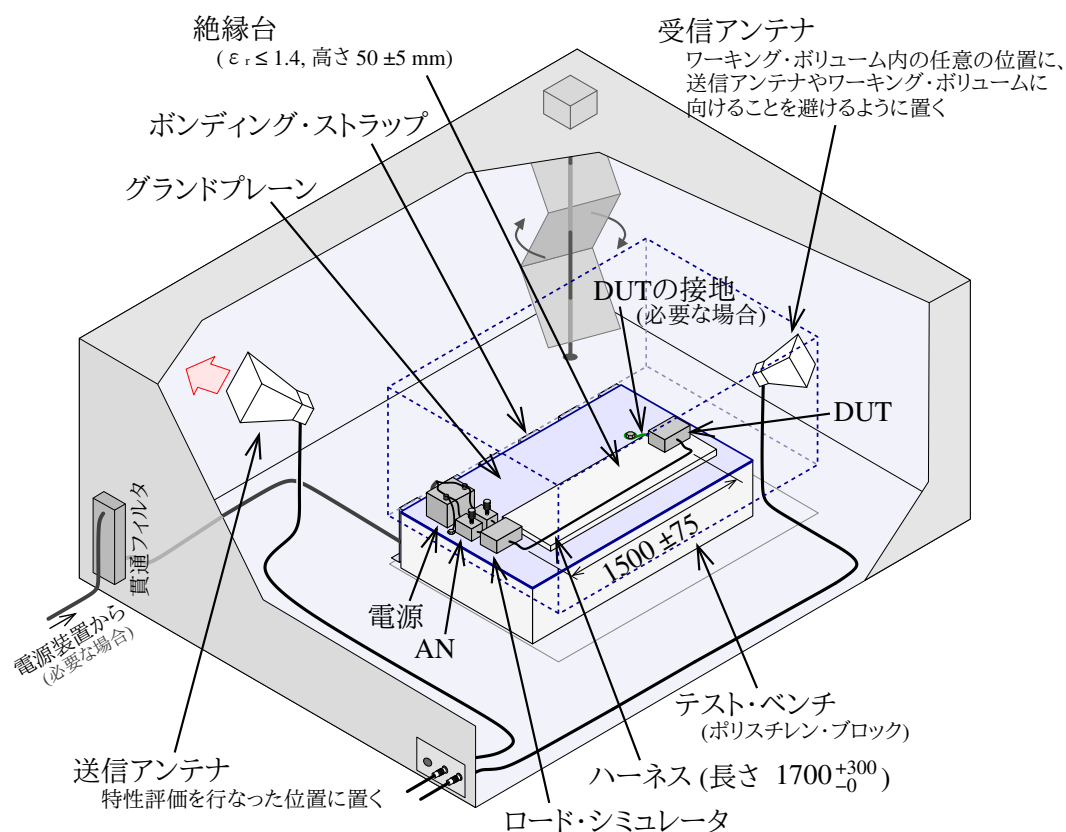


図 17: グランドプレーンを用いた試験セットアップのイメージ (§3.3.1)

ハーネスは、真っ直ぐに引かれる部分が 1500 ± 75 mm となるように“U 形”に配置してロード・シミュレータに接続する。

グラウンドプレーンを用いる場合、DUT とハーネスは非導電性、低誘電率 ($\epsilon_r \leq 1.4$) の素材でグラウンドプレーンから 50 ± 5 mm 離して置く。

- グラウンドプレーンを用いる場合、ロード・シミュレータは望ましくはグラウンドプレーン上に直接置き、その筐体をグラウンドプレーンに接続する。

3.3.2 チャンバー特性係数 A_{CCF}

DUT 等の配置を §3.3.1 で述べるように行ない、各試験周波数について、

- 送信アンテナに適度な進行波電力 P_{Forw} を入れる
- チューナーを 1 回転させ、その各ステップで受信アンテナでの受信電力 P_{Rec} を記録する。
- チューナーの 1 回転のあいだの受信電力の平均値 $P_{\text{Rec,avg}}$ と進行波電力の平均値 $P_{\text{Forw,avg}}$ からチャンバー特性係数 A_{CCF} を求める：

$$A_{CCF} = \frac{P_{\text{Rec,avg}}}{P_{\text{Forw,avg}}}$$

あるいは、[1] の Annex C.3 で述べられている代替手段を用いることもできる。

3.3.3 チャンバー負荷係数 F_{CLF}

チャンバー負荷係数 (chamber loading factor) F_{CLF} は次の式で求められる：

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

チャンバー負荷係数 F_{CLF} が 10 % 以上の周波数で最大チャンバー負荷係数 F_{MLF} (§3.2.2) を超えた場合、チャンバー内の負荷が過大で、フィールド均一性が損なわれている可能性があるものと判断する。

3.3.4 最小試験パルス幅 $T_{p, \min}$

RF の送信の開始/停止の後のチャンバー内の電磁界の強度の増加/減少に要する時間^{†23}はチャンバーの特性やその内部の状態によって変化し、これはパルス幅の短いパルス変調で特に問題となることがある。

そこで、§3.3.2 で求めたチャンバー特性係数 A_{CCF} を含む下記の式で最小試験パルス幅 $T_{p, \min}$ を求め、これがその試験で用いるパルス変調のパルス幅よりも小さいかどうかを確認することが求められている。

最小試験パルス幅 $T_{p, \min}$ の算出には次の式を用いる：

$$T_{p, \min} = \frac{20\pi V f^2}{\eta_{\text{Tx}} \cdot \eta_{\text{Rx}} \cdot c_0^3} A_{CCF}$$

但し、

- V はチャンバーの容積
- f は周波数
- η_{Tx} と η_{Rx} はアンテナの効率で、ログペリオディック・アンテナは 75 %、ホーン・アンテナは 90 % と仮定

試験周波数の 10 % 以上で $T_{p, \min}$ が試験で用いるパルス幅よりも大きい場合、チャンバー内に電波吸収体を追加して最大チャンバー負荷係数 A_{MLF} (§3.2.2) を超えない範囲でチャンバー負荷係数 A_{CCF} を増加させ、 $T_{p, \min}$ を大きくすることが必要となる。^{†24}

3.3.5 試験の実施

試験周波数範囲の下限から上限までの、§2.9 で示した規定を満足するように決めたそれぞれの試験周波数について、

- 発生させるべき電界強度 E_{Test} 、チャンバーが空の状態 で求めたチャンバー・ゲイン G_{RC}

^{†23} §3.1 で述べたようにこのチャンバーは電磁エネルギーを蓄え、これは、RF の送信が停止されてから蓄えられていた電磁エネルギーのレベルが低下するの、また RF の送信が開始されてから蓄えられた電磁エネルギーのレベルが上昇するのに時間を要することを意味する。

^{†24} チャンバー内の負荷 (ここでは電波吸収体) を増やすとチャンバーの Q が低下してチャンバー内の空間に蓄えられるエネルギーが減少し、電磁界の平衡までの時間も短くなる。^[10] だが、負荷の追加はチャンバー負荷係数 A_{CCF} を増加させ、最大チャンバー負荷係数 A_{MLF} を超えさせるかも知れない。

(§3.2.1.2)、及び試験前に求めたチャンバー負荷係数 F_{CLF} (§3.3.3) から求めた進行波電力、

$$P_{Forw,Test} = F_{CLF} \left(\frac{E_{Test}}{G_{RC}} \right)^2$$

を送信アンテナに加える。

- チューナーの回転の各ステップでドウエル・タイム (試験機器の応答時間とチューナーが回転して完全に静止するまでの時間を除き、最小 2 秒) のあいだ停止させながら、チューナーをチャンバーの特性評価 (§3.2.1.1) の際と同一かそれよりも細かいステップで 1 回転させ、
 - DUT への影響を観測し、あらかじめ決められた基準に照らして判定を行なう;
 - 受信アンテナでの受信電力 $P_{Rec,Test}$ を記録し、またそのチューナーの 1 回転のあいだでの平均値 $P_{Rec,Test,avg}$ を求めて記録する。
 $P_{Rec,Test,avg}$ は試験前のローディングの確認 (§3.3.2) における $P_{Rec,avg}$ から換算した値と比較し、それが 3 dB を超えて変化したならば対処する;
 - アンテナへの進行波電力 $P_{Forw,Test}$ を監視し、チューナーの 1 回転のあいだに進行波電力が 3 dB を超えて変化したならばレポートに記載する。

DUT やハーネスは様々な方向からの様々な偏波の電磁界に曝されるため、通常、偏波や配置を変えて試験を繰り返すことは不要と考えられる。

3.4 試験報告書

試験報告書には、この試験法に関連する以下の情報も記載すべきである;

- 測定時に受信アンテナで観測された最大受信電力 $P_{Rec,Test,max}$ 、及び平均受信電力 $P_{Rec,Test,avg}$ のカーブ;
- 送信アンテナへの平均進行波電力 $P_{Forw,Test,avg}$;
- $P_{Forw,Test}$ の変動が 3 dB を超えた場合、その変動;
- チャンバー負荷係数 F_{CLF} (§3.3.3)、及び最大チャンバー負荷係数 F_{MLF} (§3.2.2) のカーブ;
- チューナーのステップ数。

3.5 補足

3.5.1 主な記号

- A_{ACF} — 受信アンテナ特性係数 (§3.2.1.4)
チャンバー特性係数 $A_{CCF,i}$ の平均値
- $A_{CCF,i}$ — チャンバー特性係数 (§3.2.1.1 item 3(c)v)
特性評価のために電界プローブを位置 i に置いた状態で求められた $P_{Rec,avg}/P_{Forw,avg}$
- A_{CCF} — チャンバー特性係数 (§3.3.2)
試験のために DUT などを配置した状態で求められた $P_{Rec,avg}/P_{Forw,avg}$
- $E_{\square}$ — チューナーの特定のステップでの、電界プローブの各軸での電界強度 (§3.2.1.1 item 3(c)ii)
- $e_{\square,avg}$ — 各軸の電界の測定値の正規化された最大値の平均値 (§3.2.1.1 item 1)
全プローブ位置で得られた $e_{\square,i}$ の平均値
- $e_{\square,i}$ — 各軸の電界の測定値の正規化された最大値 (§3.2.1.1 item 3(c)iv)
 $E_{\square,max}$ を送信アンテナへの平均進行波電力 $P_{Forw,avg}$ の平方根で正規化したもので、 $e_{\square,i} = E_{\square,max}/\sqrt{P_{Forw,avg}}$
- $E_{\square,max}$ — チューナーの 1 回転のあいだの電界プローブの各軸での最大電界強度 (§3.2.1.1 item 3(c)iii)
- F_{CLF} — チャンバー負荷係数 (§3.3.3)
チャンバーが空の状態での受信アンテナ特性係数 $A_{ACF,empty}$ (チャンバー特性係数 $A_{CCF,i}$ の平均値) の、試験のために DUT などを配置した状態でのチャンバー特性係数 A_{CCF} に対する比率で、 $F_{CLF} = A_{ACF,empty}/A_{CCF}$
- f_{LUF} — 最低使用可能周波数 (§3.2.1.5)
- F_{MLF} — 最大チャンバー負荷係数 (§3.2.2)
チャンバーが空の状態での受信アンテナ特性係数 $A_{ACF,empty}$ の、均一性要求を損なわない範囲で負荷を追加した状態での受信アンテナ特性係数 $A_{ACF,loading}$ に対するの比率で、 $F_{MLF} = A_{ACF,empty}/A_{ACF,loaded}$
- G_{RC} — チャンバー・ゲイン (§3.2.1.2)
- P_{Forw} — 送信アンテナへの進行波電力 (図 1)
- $P_{Forw,avg}$ — 平均進行波電力 (§3.2.1.1 item 3(c)iii)
チューナーの 1 回転のあいだの P_{Forw} の平均値
- P_{Rec} — 受信アンテナでの受信電力 (図 1)
- $P_{Rec,avg}$ — 平均受信電力 (§3.2.1.1 item 3(c)iii)
チューナーの 1 回転のあいだの P_{Rec} の平均値
- $P_{Rec,max}$ — 最大受信電力 (§3.2.1.1 item 3(c)iii)
チューナーの 1 回転のあいだの P_{Rec} の平均値
- $T_{p,min}$ — 最小試験パルス幅 (§3.3.4)
試験のために DUT などを配置した状態で求められた、試験が可能な最小のパルス幅
- $\sigma_{\square}$ — 各軸の電界の測定値の正規化された最大値の標準偏差 (§3.2.1.3 item 2)
- σ — 電界の測定値の正規化された最大値の標準偏差 (§3.2.1.3 item 3)
- $\eta_{\square}$ — アンテナの効率 (§3.3.4)

3.5.2 ALSE 法との比較

ISO 11452-11 (リバブレーション・チャンバー) は、DUT やハーネスが空間に放射された電磁界に曝されるという点では ISO 11452-2 (ALSE 法)^[8] と同様であるが、それ以外の点は大きく異なる。

主な違いは、

- ALSE 法では電界強度が送信アンテナの概ね正面の一点のみで管理され、その他の位置での電界強度 (送信アンテナの放射パターンなどの影響を受けることが予想される) は全く管理されない。

それに対して、この試験法ではワーキング・ボリウム全体で統計的な均一性が達成され、従って DUT システムの全ての部分が統計的に均一な電磁界に曝される。

- ALSE 法では DUT やそのハーネスは主として放射アンテナからの直接波のみに、従って主として特定の方向からの特定の偏波の電磁界に曝される。

それに対して、この試験法では DUT システムの全ての部分がランダムな方向からのランダムな偏波の電磁界に曝される。

- 上記の理由のため、この試験法では偏波や照射方向を変えて試験を繰り返す必要はない。
- この試験法では各周波数についてチューナーの回転のそれぞれのステップでドウェル・タイムの時間の観測を行なうことから、試験時間はかなり長くなることが予想される。

この規格上の最小の、また推奨されるチューナーのステップ数は表 4 で示したが、実際のステップ数は試験施設によっても異なる可能性がある。

- リバブレーション・チャンバーではチャンバーがゲインを与えることから比較的小さい電力で高い電界強度を得ることが可能である。^{†15}
- この試験法での校正や試験の手続きは ALSE 法と比べてかなり煩雑となる。

3.5.3 関連規格

リバブレーション・チャンバーによるイミュニティ試験は、他の規格、例えば DO-160G §20.6、MIL-STD-461G RS103 代替試験法、IEC 61000-4-21 などにも含まれるが、その内容は規格によって相違がある。

4 参考資料

- [1] ISO 11452-11:2010, *Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 11: Reverberation chamber*
- [2] ISO 11452-1, *Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — General principles and terminology*
- [3] ECE Regulation No. 10 Revision 6, *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to electromagnetic compatibility*, United Nations, 2019
<https://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs1-20.html>
- [4] ECE Regulation No. 10.06 の概要, 株式会社 e・オートマ, 2014–2021,
<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [6] CISPR 25 の概要 — 車載機器のエミッションの評価, 株式会社 e・オートマ, 2016–2023,
<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [7] 車載機器の EMC 試験の準備 — ロード・シミュレータ、テスト・ハーネスなどの準備, 株式会社 e・オートマ, 2018,
<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [8] ISO 11452-2 の概要 — 車載機器のイミュニティ試験 (ALSE 法), 株式会社 e・オートマ, 2024,
<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [9] NASA/TM-2010-216181, *Reverberation Chamber Uniformity Validation and Radiated Susceptibility Test Procedures for the NASA High Intensity Radiated Fields Laboratory*, Sandra V. Koppen et al., 2010
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20100003366>
- [10] *Effect of absorber number and positioning on the power delay profile of a reverberation chamber*, Luca Bastianelli et al., 2015, IEEE, DOI: 10.1109/ISEMC.2015.7256199

- [11] *Reverberation chambers à la Carte: An overview of the different mode-stirring techniques*, R. Serra, et al., 2017, IEEE, DOI: [10.1109/MEMC.2017.7931986](https://doi.org/10.1109/MEMC.2017.7931986)
- [12] *Electromagnetic Reverberation Chambers*, Philippe Besnier and Bernard Démoulin, 2011, Wiley-ISTE, ISBN: 1848212933
- [13] *Evaluation of Transmit Antenna Position in Reverberation Chamber* Zhiyong Yuan et al., 2007, IEEE, DOI: [10.1109/TEMPC.2006.888186](https://doi.org/10.1109/TEMPC.2006.888186)