

ISO 11452-9 の概要 — 車載機器のイミュニティ試験 (可搬型送信機)

株式会社 e・オートマ 佐藤智典

2024 年 4 月 1 日

目次

1	はじめに	1
1.1	概要	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	ドウェル・タイム	7
2.8	FPSC	8
2.8.1	ISO 11452-1:2015	8
3	ISO 11452-9	8
3.1	使用機器	8
3.1.1	信号発生器	8
3.1.2	電力増幅器	9
3.1.3	双方向性結合器	9
3.1.4	電力測定器	9
3.1.5	同軸ケーブル	10
3.1.6	送信アンテナ	10
3.2	試験計画	11
3.2.1	試験周波数、試験レベル、変調など	12
3.2.2	照射の範囲	12
3.3	試験方法	12
3.3.1	伝送損失や反射係数の測定	12
3.3.2	試験レベルの設定	13
3.3.3	DUT とハーネスの配置	14
3.3.4	DUT とコネクタへの照射	14
3.3.5	ハーネスへの結合	16
4	補足	18
4.1	試験レベルの例	18
4.2	パワーセンサのパルス応答	18
4.3	進行波電力と反射波電力からの正味電力や反射係数の算出	19
4.4	人体の電磁界への曝露	20
4.4.1	ISO 11452-9:2012 からの主な変更点	20
5	参考資料	21

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、可搬型無線送信機の近接を模擬する試験法に関して定めた ISO 11452-9:2021^[1] の概要を述べる。

なお、本稿はこれら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。

1.1 概要

携帯電話に代表されるような可搬型の無線送信機が車内で用いられることも普通となっている。このような無線送信機の高周波出力はそれほど大きくはないものの、その近傍では極めて強い電磁界を生じ、近傍の電子機器に著しい影響を与えることがある。従来も業務用の無線やアマチュア無線などの使用やそれに伴う問題の発生はあったものの、車両の著しい電子化、そして携帯電話などの無線機器の爆発的な普及は、この種の干渉の可能性を著しく増大させている。



ISO 11452-2 (ALSE 法) に代表されるような、ISO 11452 シリーズ^[5]に含まれている無線周波電磁界に対するイミュニティの評価のための伝統的な試験法は、長年、広く用いられている。だが、それらの試験法は車両外の離れた場所から放射される電磁界 (例えば放送施設、無線基地局、レーダー施設からのもののような) の影響の評価を主に想定したもので、このような事象の評価のための使用に適しているとは言い難い。

本稿で述べる ISO 11452-9 はこのような無線送信機の近傍での使用の影響の評価を特に意図したものであり、様々な周波数帯の可搬型送信機を模擬する小型の送信アンテナを DUT やハーネスの近傍の様々な位置に置いて電磁界を照射することで試験を行なう。

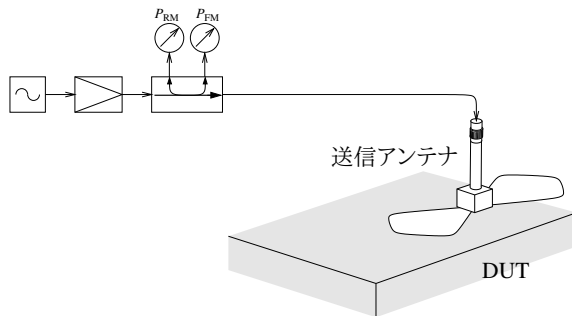


図 1: 試験の原理

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 11452-1:2015 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^{†1}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。

^{†1} 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。

2.1.1 低圧 DC 電源

低圧 (LV) DC^{†1}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 μs 以内に最大変動の 63 % を回復する;
- 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^{†2}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^{†3}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、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^{†4}

^{†2} 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。

^{†3} 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。

^{†4} 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。

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 ± 0.5 V	27 ± 1 V	—	—	—
ISO 11452-1:2015	13 ± 1 V	26 ± 2 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

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^{†1} 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) には充電器が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。

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。

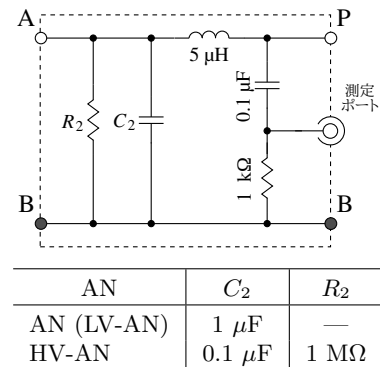


図 2: LV-AN, HV-AN の原理

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^{†5}

^{†5} 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)

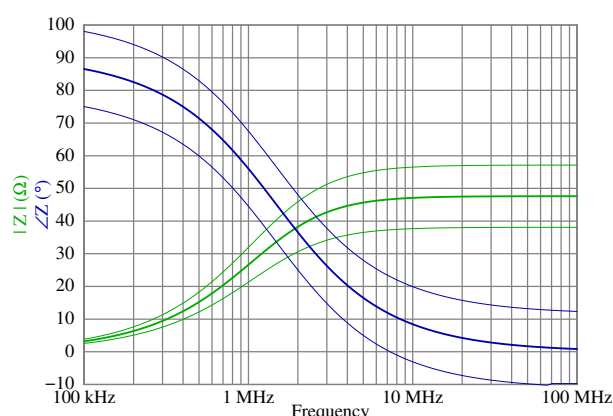


図 3: $5 \mu\text{H}/50 \Omega$ AN のインピーダンス Z_{PB} (測定ポートを 50Ω で終端、端子 A-B を短絡した状態での計算値)

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)^{†6}

- 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。

少なくとも ISO 11452-2:2019 では AN とロード・シミュレータのあいだの配線はできる限り短くなけ

^{†6} 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。

ればならず、またテスト・プランで指定しなければならない。

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。^{†7}

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

^{†7} 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。

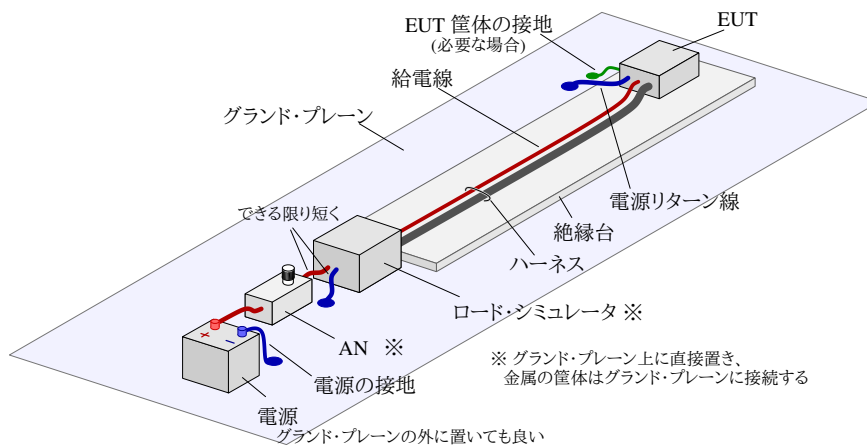


図 4: ローカルでの接地

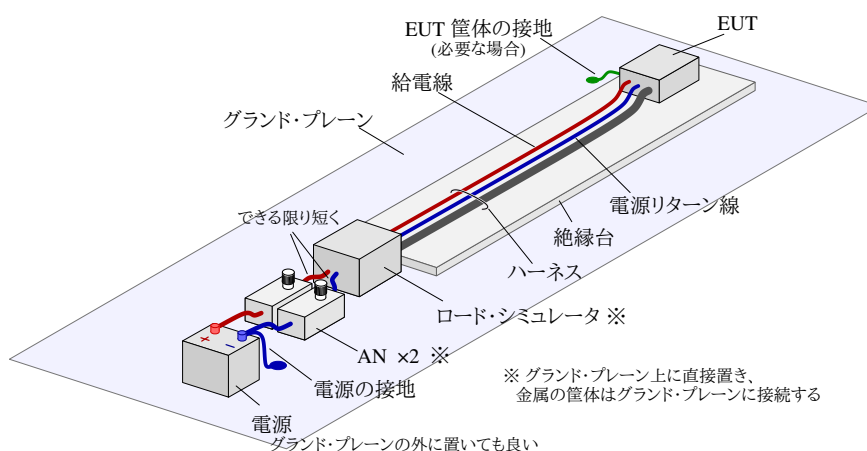


図 5: 遠隔での接地

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。

電源線上の PLC 用の 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おり、コモン・モード・インピーダンスを制御する機

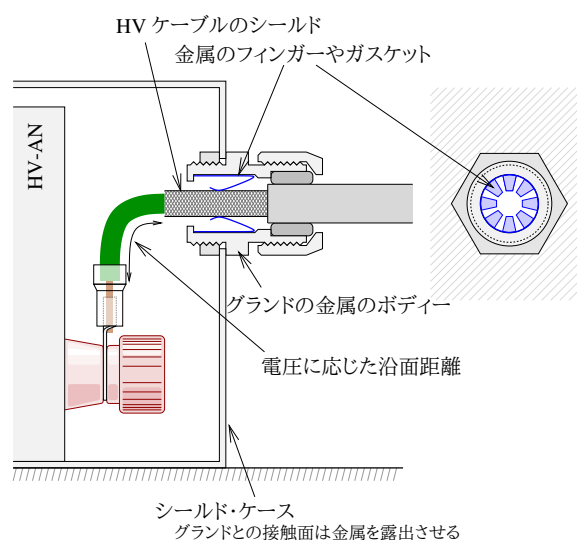
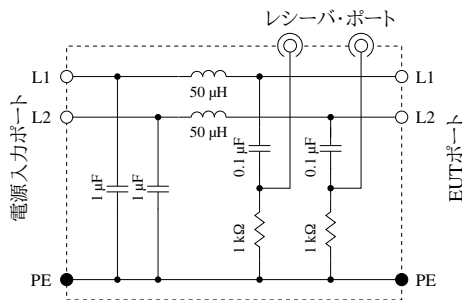
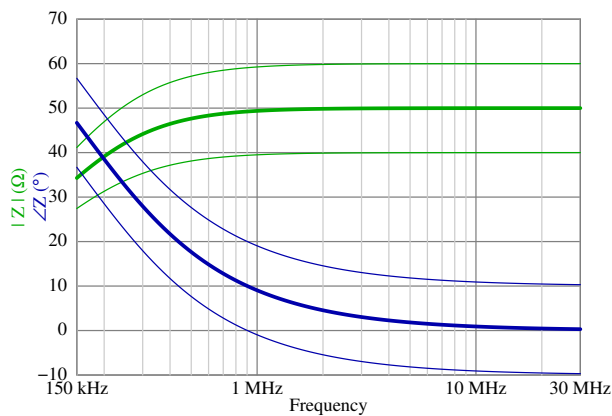
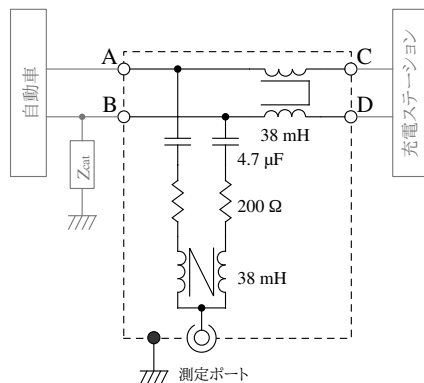


図 6: HV ケーブルの HV-AN への接続の例 — ケーブルのシールドをケーブル・グラウンドの金属のフィンガーなどを介してシールド・ケースに 360° 接続する

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: AAN (対称信号/制御ポート) の原理 — 2 線 (1 対) 用

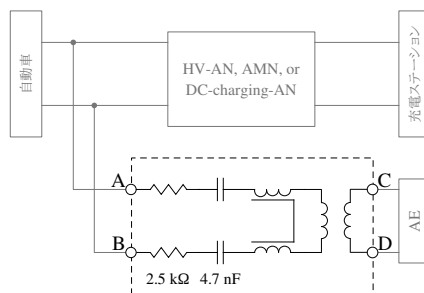


図 10: AAN (電源線上の PLC) の原理

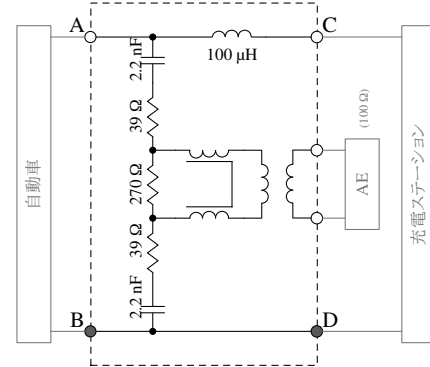


図 11: AAN (コントロール・パイロット上の PLC) の原理

能を持たない^{†8}が、その他の AAN (図 9, 図 11) は 150 Ω のコモン・モード・インピーダンスを与えるようになっている。

対称通信線用の 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

^{†8} 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。

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・ルームの壁に位置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。^{†9}

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 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ずつ印加し、DUT^{†10}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

^{†9} ロード・シミュレータについては [7] で解説している。

^{†10} device under test (被試験装置)。EUT (equipment under test) と呼ばれることもある。

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、ドウェル・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。

2.8 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。

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 Status I~IV のいずれを満足する必要があるか、また 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。^{†11}

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、安全に関係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。安全に関係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。

2.8.1 ISO 11452-1:2015

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 11452-9

3.1 使用機器

3.1.1 信号発生器

試験で必要となる変調された妨害信号を発生させるために適切な RF 信号発生器を用いる。

パルス変調、振幅変調、周波数変調などの伝統的な変調がかけられた妨害は他のイミュニティ試験でも用いられているような信号発生器で発生できるであろう。

だが、現代的な無線で用いられることがある OFDM (直交周波数分割多重方式) などの変調、またこの規格^[1] の Annex F (informative) で触れられているような帯域制限された広帯域ノイズ (現代的なデジタル変調を模擬する)^{†12} の発生のためには他の手段が必要となる。

帯域制限された広帯域ノイズの発生に関して、この規格の Annex F では半導体で発生するような真のランダム雑音を利用する方法、また任意波形発生器と疑似乱数系列を用いる方法に言及されているが、広帯域ノイズを簡単に発生できる AWGN (加

^{†11} 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。

^{†12} 伝統的には無線周波電磁界に対するイミュニティ試験では狭帯域の妨害が用いられており、この規格の表題も「狭帯域の放射電磁エネルギーからの電磁妨害に対するコンポーネント試験法」のようになっている。だが、放射エネルギーが狭い帯域に集中する伝統的な無線と異なり、現代的な無線では広帯域の信号が用いられることが多く、これはこの種のイミュニティ試験でもそれを模擬するような広帯域の妨害を用いる動機となる。

法性白色ガウス雑音) 発生機能を内蔵した、あるいはオプションで追加できる信号発生器も市販されており、そのようなものを利用できるかも知れない。

3.1.2 電力増幅器

必要な周波数範囲や出力に対応した RF 電力増幅器を用いるが、可搬型無線送信機を模擬するという性質上、通常はそれほど高出力の増幅器は必要とならないだろう。

特に、現代的な可搬型無線は比較的低い出力を用いることが多く、この規格の Table D.1 (informative) で示されている試験レベルの例で 700~6000 MHz について示されている試験レベルは試験レベル IV でも 0.8 W となっている (表 5)。^{†13}

信号の品質に関して、ISO 11452-1^[2] では 1 GHz 以下は -12 dBc 以下、1 GHz 以上は -6 dBc 以下が要求されている (§2.6) だけであるが、この規格では少なくとも Annex F (informative) で触れられているような広帯域ノイズを用いる場合については -20 dBc 以下であることも推奨されている。

3.1.3 双方向性結合器

進行波電力と反射波電力の測定のため、必要な周波数範囲と電力に対応した、次のような特性を持つ双方向性結合器を用いる:

- 結合係数: $> 20 \text{ dB}$ (40 dB を推奨) ($C_{FFlg} < -20 \text{ dB}$, $C_{FRlg} < -20 \text{ dB}$)
- 入出力ポートの VSWR: < 1.3
- 結合ポートの VSWR: < 1.5
- 挿入損失: $< 0.5 \text{ dB}$ ($-0.5 \text{ dB} < A_{DClg} < 0 \text{ dB}$)
- 方向性: $> 18 \text{ dB}$ ^{†14}

^{†13} 勿論、反射や減衰による損失があり、また少なくとも AWGN (§3.1.1) のような信号 (波高率は 15~20 dB 程度となるかも知れない) を用いる場合にはそのための余裕も必要となるため、使用する電力増幅器はこれよりはかなり高い出力への対応が必要となるだろう。

^{†14} 方向性が 15 dB 程度の方向性結合器も珍しくないため、注意が必要かも知れない。また、方向性が悪くても試験の結果への影響は予期されないものの、方向性は VSWR (あるいは反射係数や反射波電力) の観測に大きく影響する (例えば、実際の負荷の VSWR が 1 であったとしても、方向性結合器の結合ポートの出力からは、方向性が 15 dB の場合は 1.5 弱、方向性が 18 dB でも 1.3 弱の値が得られることが予期される) ため、これを正確に監視したい場合などはそれに応じて方向性の高い方向性結合器が必要となりそうである。

3.1.4 電力測定器

方向性結合器の結合ポートに接続して進行波電力と反射波電力を測定するため、その信号の測定に適した、 $VSWR < 1.2$ 、測定精度 $< 0.5 \text{ dB}$ の下記のようなパワーセンサを用いる:

- 連続波 (CW)、振幅変調 (AM) — アベレージ・パワーセンサ、もしくはピーク・パワーセンサ^{†15}
- パルス変調 (PM) — ピーク・エンベロープ・パワーセンサ^{†16†17}

パワーセンサは一般に高い測定精度を持つが、電力の正確な測定のためには適切なパワーセンサを選択して精度を維持できるような形で適切に校正することが、そしておそらくは測定時のゼロ/キャル、また周波数応答の補正 (校正カーブの適用) を適切に実施することが必要となるだろう。

その変調信号の電力の測定が可能で、また精度^{†18}などの要求を満足するならば、スペクトラム・アナライザや測定用レシーバをこの測定に用いることもできる。

電力の換算 この試験では通常は変調された信号の電力の測定が必要となる。

連続波 (CW) に対する測定結果はパワーセンサのタイプ (アベレージ、ピーク・エンベロープ、連続波など) に依存しないが、変調波に対する測定結果はパワーセンサのタイプと変調の性質の影響を受け、その換算が必要となることがある (図 12)。

- ピーク・エンベロープ・パワーセンサでの測定
ピーク・エンベロープ・パワーセンサはその応答特性 (§4.2) の範囲内で変調に関わらずピー

^{†15} この規格での「ピーク・パワーセンサ」と「ピーク・エンベロープ・パワーセンサ」との使い分けの意図は把握していないが、図 12 で図示するようにここではその変調波形のピーク・エンベロープ・パワーを測定できれば良く、その変調波形のピーク・エンベロープ・パワーの測定に適したパワーセンサを使用可能と考えて良いだろう。

^{†16} 必要な周波数範囲と電力の範囲への対応に加え、その変調波形の観測に適した応答 (ビデオ帯域幅) も必要となる (§4.2)。

^{†17} ピーク・エンベロープ・パワーを測定可能なパワーセンサはピーク・パワーセンサやワイドバンド・パワーセンサなどと呼ばれることもあり、その種のパワーセンサ/パワーメータは設定によって何の測定を行なうかや応答特性などを選択できることもある。従って、その名称に関わらず、その変調波形のピーク・エンベロープ・パワーの測定に適した機器を選択し、正しく使用することが必要となるだろう。

^{†18} この種の測定器はパワーセンサ/パワーメータと比較して精度が有意に低いかも知れず、さらに方向性結合器とのあいだのケーブルの影響も加わることになるため、この種の測定器の使用には注意が必要かも知れない。

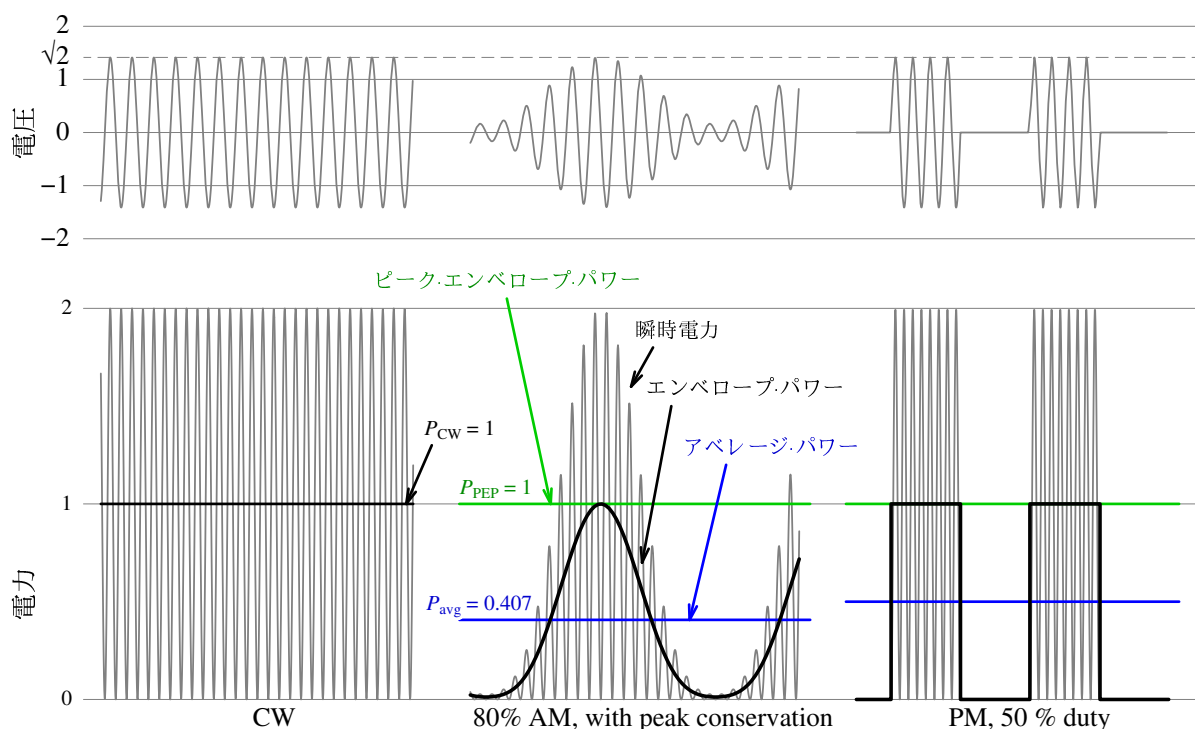


図 12: 振幅変調と電力

ク・エンベロープ・パワーを示すので、振幅変調とパルス変調のいずれについても換算は不要となるだろう。

にアベレージ・パワーセンサを用いることはない。

● アベレージ・パワーセンサでの測定

図 12 のような、正弦波での変調度 $m = 0.8$ の振幅変調^{†19}を仮定した場合、その電力をアベレージ・パワーセンサで測定した時に得られる電力 P_{avg} とそれに相当する連続波の電力 P_{CW} とは、

$$P_{\text{avg}} = \frac{2 + m^2}{2(1 + m)^2} P_{\text{CW}} \approx 0.407 P_{\text{CW}}$$

の関係を持つので、この関係を用いて換算を行なえる。

パルス変調の場合、ピーク・エンベロープ・パワーセンサの使用が規定されており、その測定

3.1.5 同軸ケーブル

方向性結合器から送信アンテナまでのケーブル (該当する場合、中継コネクタなどを含む) は、VSWR < 1.1 、伝送損失 $< 4 \text{ dB}$ ($-4 \text{ dB} < A_{\text{lg}} < 0 \text{ dB}$) のものとする。

3.1.6 送信アンテナ

この規格では、送信アンテナとして、周波数範囲に応じて表 3 に示すようなタイプのものの使用に言及されており、その詳細が Annex C (informative) で示されている。

異なるタイプのアンテナで周波数範囲が重複している (表 3, 図 13) 部分があるが、試験を行なうそれぞれの周波数についていずれか 1 つのタイプのアンテナを用いれば良く、同一の周波数について異なるタイプのアンテナで試験を繰り返す必要はない。

この規格のいずれの試験でも、選択された位置 (§3.3.4 でのセルの中央や §3.3.5 でのハーネス上の所

^{†19} この試験で振幅変調 (AM) が用いられることは少ないかも知れない。アマチュア無線などでまだ振幅変調が用いられるケースはあるものの、その使用は減っており、この規格の Table B.1^{†25} では振幅変調は 10 m バンド (26~30 MHz)^{†20} での試験変調としての使用が例示されているだけである。

^{†20} 142 MHz よりも低い周波数の試験に関する情報は、この規格の Table D.1 の試験レベル、また本文中や Annex C の送信アンテナに関する記載にも含まれていない。

アンテナの種類	周波数範囲	セルの寸法 “d” (mm)	ISO 11452-9 上の記載
折り返しダイポール・アンテナ	142～246 MHz	100	Annex C.5
スリーブ・アンテナ	380～460 MHz	50	Annex C.4
広帯域ダイポール・アンテナ	360～2700 MHz	100	Annex C.2
広帯域スリーブ・アンテナ	700～3200 MHz	50	Annex C.3
マイクロ波広帯域ダイポール・アンテナ	2000～6000 MHz	50	Annex C.6
HF 広帯域スリーブ・アンテナ	2400～6000 MHz	50	Annex C.7

表 3: 送信アンテナのタイプとセルの寸法

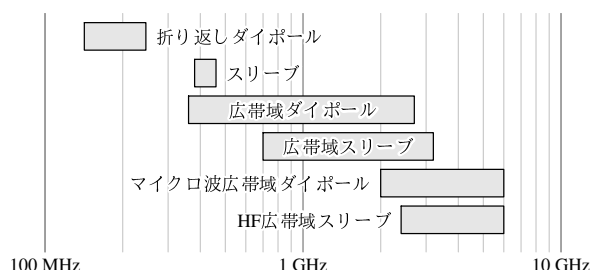


図 13: 各タイプの送信アンテナの周波数範囲



図 14: 広帯域ダイポール・アンテナの例 (写真は Schwarzbeck 社提供)

定の距離) にアンテナの中心点^{†21}を合わせて置いた時、またその位置にエレメントの基準点を置いた時のそれぞれについて、またアンテナを直交する 2 つの向きのそれぞれとして照射を行なう (図 20～図 25)。^{†22}

^{†21} 双方のエレメント (あるいはエレメントとスリーブ) の中間点。広帯域ダイポール・アンテナ、折り返しダイポール・アンテナ、マイクロ波ダイポール・アンテナの場合はこの位置はアンテナの幾何的な中心と一致するだろう。広帯域スリーブ・アンテナ、スリーブ・アンテナ、HF 広帯域スリーブ・アンテナの場合はこれは双方のエレメント (あるいはエレメントとスリーブ) に線路が接続される位置、すなわち給電点となるだろうが、これはアンテナの幾何的な中心とは一致しないだろう。

^{†22} 実際に観測される電磁界の強度はアンテナの構造や周波数、アンテナからの距離などに依存するが、この規格の Annex C で示されたアンテナはいずれもダイポールで、基本的には中心点^{†21}付近から磁界が、両側のエレメント (スリーブ・アンテナでは一方のエレメントはスリーブで置き換えられている) の先の方から電界が強く放射されるだろう。この規格の Annex C.4 に示されているスリーブ・アンテナの電磁界のパターンは明確にこれを示している。

この規格に適合したものとして市販されているアンテナでは、基準点の情報はアンテナの製造業者から得られると思われる。^{†23}

3.2 試験計画

試験に先立って試験の実施のために必要な全ての情報を記載したテスト・プランを作成する。^{†24}

これには次のような事項を含めることが必要となるかも知れない:

- 試験セットアップ (使用する DUT、ロード・シミュレータ、その他の周辺機器の一覧とその配置、DUT の向きなどを含む)
- DUT の動作モード
- DUT の合格基準
- 試験周波数またそれぞれの周波数に対する以下のものを含む試験条件 (§3.2.1):
 - 試験厳しさレベル (送信アンテナに注入すべき正味電力)
 - 変調
 - 使用する送信アンテナ (指定がある場合)
- DUT の監視の条件
- 照射を行なう範囲 (§3.2.2)
- テスト・レポートの内容

また、標準的な試験方法からの逸脱やその他の特別な指示があれば、それらも全て記載する。

^{†23} この規格では、基準点はアンテナの放射の幾何的な中心であって製造業者が近傍界測定に基づいて規定するものと規定されており、またアンテナ製造業者がそれぞれのアンテナについて基準点を明確に規定しなければならない旨が規定されている。

^{†24} OEM (車両メーカー) 向けの場合は、これはその OEM 規格に基づくことになるかも知れない。

合格基準は、FPSC (§2.8) の枠組みに従い、それぞれの機能に対する Status I~IV の定義と、それぞれの試験厳しきレベルでそれぞれの機能が Status I~IV のいずれとなるかが許容されるかのマトリックスとして規定できるかも知れない。

3.2.1 試験周波数、試験レベル、変調など

この規格の Table D.1 (表 5) ではそれぞれの周波数帯に対する様々な厳しき (試験レベル I~IV) の試験レベルの例が、また Table B.1^{†25} (表 4) では様々な送信機で予期される出力と典型的な変調、また試験での使用の候補となるような変調の例が示されている (§4.1)。

だが、これらはいずれも例であり、実際に試験を行なうべき周波数、それぞれの周波数についてのアンテナに注入すべき正味電力 (net power) で表現された試験レベル、妨害に適用すべき変調、また使用すべき送信アンテナの指定 (指定がある場合) はテスト・プランで明確に規定すべきであろう。

この決定は、この試験は携帯電話のような可搬型の無線送信機の近接の影響を模擬するものであることを考慮して行なわれるかも知れない。この場合、ある周波数帯の無線送信機をその機器の近傍で使う可能性が予見されるならば、その周波数帯の可搬型無線送信機で予期される出力や変調を考慮して決定した試験レベルや変調での試験を行なう価値があると判断できそうである。一方、ある周波数帯の無線送信機を近傍で使うことがありそうにないならば、その周波数帯についての試験は不要と判断できるかも知れない。

あるいは、規格の Table B.1 (表 4)^{†25} で示されたパラメータをベースとして、あるいは規格の Table D.1 (表 5) の周波数範囲を網羅するように (例えばその周波数範囲の事前に決めた周波数毎に) 試験するなどの方法も考えられるかも知れない。

3.2.2 照射の範囲

電磁界の照射を行なう範囲、すなわち DUT のどの面やどのハーネスに対して照射を行なうかもテスト・プランで規定する。

これは、実際の使用に際して送信状態の可搬型無線送信機が近付けられる可能性やその機器の重要性を考慮して決める^{†26} ことも、あるいは実際の使用で予期される状況とは無関係に DUT の全ての面と全てのハーネスを評価の対象とすることもできるであろう。

さらに、送信状態の無線送信機が非常に近い位置に置かれる可能性が予期される場合、この規格に従った送信アンテナを距離 50 mm に置いての評価に加え、そのような状況になりそうな範囲については送信アンテナをより近い距離に、場合によっては DUT に密着させるように置いての確認を追加で行なう価値があると判断されるかも知れない。^{†27}

さらに、送信状態の無線送信機が非常に近い位置に置かれる可能性が予期される場合、この規格に従った送信アンテナを距離 50 mm に置いての評価に加え、そのような状況になりそうな範囲については送信アンテナをより近い距離に、場合によっては DUT に密着させるように置いての確認を追加で行なう価値があると判断されるかも知れない。^{†27}

3.3 試験方法

3.3.1 伝送損失や反射係数の測定

試験で使用する送信アンテナの反射係数、それとともに用いるケーブルや方向性結合器の伝送損失や結合係数などは、規格の §6.2.5 で規定された要求を満足するベクタ・ネットワーク・アナライザ (VNA) を用い、規格の Annex A で規定されたように測定する。

送信アンテナの反射係数の測定は、図 15 や図 16 のように、アンテナと VNA のあいだを 500 mm 以上離し、またアンテナの放射の方向は 500 mm 以上、その他の方向も 250 mm 以上の空間を確保するようにアンテナを設置して行なう。

規格上は測定を行なう場所の規定はなく、通常は試験で用いるものと同様の電波暗室内で行なえば良いだろう。

^{†26} この場合、例えば車両の内面から離れた位置に取り付けられる機器はこの試験での評価の必要性は低い、あるいはこの規格に従った送信アンテナを距離 50 mm に置いての評価の代わりに送信アンテナを実際の状況を模擬するより離れた位置に置いての確認を行なえば充分であると判断されるかも知れない。また、それが軽微な影響 (例えばオーディオの不調のような) しか引き起こさないならば可搬型送信機が近づくかも知れないとしても試験は不要、重大な影響 (例えばエアバッグの意図しない展開のような) を引き起こすかも知れないならば可搬型送信機が稀にしか近付かないかも知れない箇所も試験が必要、のように判断されるかも知れない。

^{†27} 例えば JLR-EMC-CS^[9] では、手持ち型の送信機と密着するかも知れないキーや類似のデバイス、また意図的な保管場所から 50 mm 以内に取り付けられるかも知れない DUT の面やハーネスの最初の 300 mm は、送信アンテナを 5 mm の距離に置いての試験を追加で行なうように述べられている。

^{†25} その抜粋を 表 4 に示した ISO 11452-9:2021^[1] の Table B.1 (informative) は市販の可搬型送信機を用いての追加の試験に関連して参考情報として示されているもので、本稿で述べたような送信アンテナを用いた試験に関する規定の一部として記載されたものではない。また、これは近傍で使用される可能性がある可搬型無線送信機を網羅したものでもない。

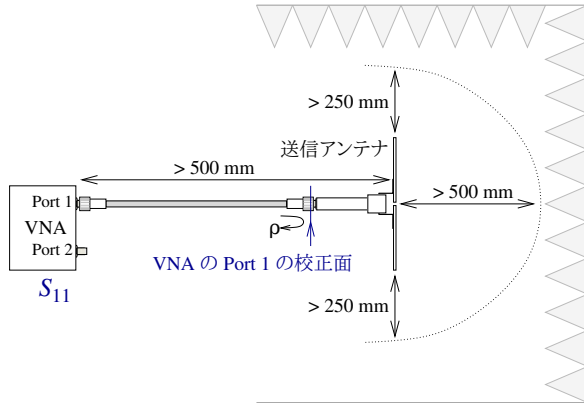


図 15: 送信アンテナの反射係数の測定 (広帯域ダイポール・アンテナの例)

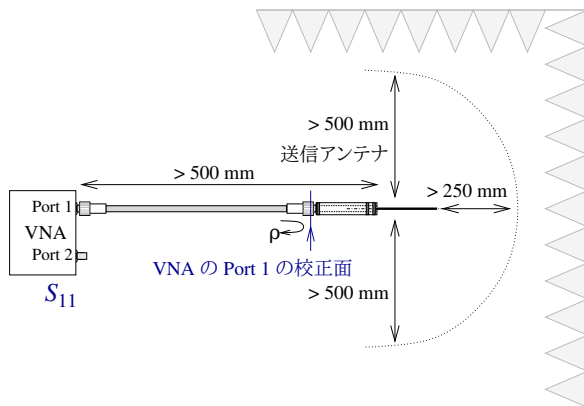


図 16: 送信アンテナの反射係数の測定 (スリーブ・アンテナの例)

3.3.2 試験レベルの設定

一般に正味電力 (net power) は進行波電力から反射波電力を差し引いて求めることができる。だが、この規格での試験に関しては、その Annex A で、正味電力を測定された進行波電力と反射波電力とから定まるような形ではなく、進行波電力とあらかじめ測定された伝送損失や反射係数 (§3.3.1) とから定まるような形で規定されている。

試験では、次のような式を用いて送信アンテナに注入すべき正味電力 P_{NA} と系統のパラメータとから進行波電力の測定用のパワーメータで観測されるべき電力 P_{FM} を求め、パワーメータでの読みを $P_{FM}^{+0.5 \text{ dB}}_{-0 \text{ dB}}$ に合わせる (§3.1.4 で触れたような補正が必要な場合はいずれかの値を適切に補正した上で) ことで正味電力の設定を行なうことができる:

$$P_{FM} \text{ (W)} = \frac{C_{FF} \cdot P_{NA}}{(A \cdot A_{DC}) \cdot (1 - \rho^2)}$$

但し、

- P_{NA} は送信アンテナに注入すべき正味電力 (W)
- ρ は送信アンテナの反射係数で $\rho = |S_{11}| = \frac{V_{SWR} - 1}{V_{SWR} + 1}$
- A は方向性結合器から送信アンテナまでの伝送損失^{†28}で $A = 10^{A_{lg}/10}$
- A_{DC} は方向性結合器の伝送損失で $A_{DC} = 10^{A_{DC \lg}/10}$
- C_{FF} は方向性結合器の進行波結合係数で $C_{FF} = 10^{C_{FF \lg}/10}$
- C_{FR} は方向性結合器の反射波結合係数で $C_{FR} = 10^{C_{FR \lg}/10}$
- A_{lg} , $A_{DC \lg}$, $C_{FF \lg}$, $C_{FR \lg}$ はそれぞれ dB で表現されたパラメータでいずれも $< 0 \text{ dB}$ 、また A , A_{DC} , C_{FF} , C_{FR} はそれらを真数で表現したものでいずれも < 1 ^{†29}

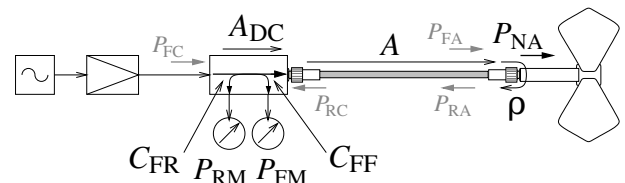


図 17: 試験系統のパラメータ

このプロセスでは反射波電力の情報は使用されないが、反射波電力も測定して記録することが推奨される。

上と同様に正味電力 P_{NA} と系統のパラメータとから求めた反射波電力の測定用のパワーメータで観測されるべき電力 P_{RM} は次のようになる:

$$P_{RM} = \frac{C_{FR} \cdot A \cdot \rho^2 \cdot P_{NA}}{(1 - \rho^2)}$$

実際に観測された値がこの値から大きく外れたり試験中に不自然な変動を生じたりする^{†30}場合、何らの異常を疑うべきかも知れない。

^{†28} A や A_{DC} を「損失」と呼ぶのは誤解を招くかも知れない。これらはその経路に入射した電力が負荷側まで伝えられる割合 ($|S_{21}|^2$) で、その経路での損失分を表しているわけではない。

^{†29} これらのパラメータは正の dB の値で表現することが多い。例えば §3.1.3 のパラメータの記載 (これらの記載は規格に基づく) でも結合係数 ($C_{FF \lg}$ と $C_{FR \lg}$ に相当) と挿入損失 ($A_{DC \lg}$ に相当) は正の dB の値で表現されている。

^{†30} この反射はアンテナ近傍の物体の影響を受ける可能性があり、アンテナの位置によるある程度の変動は異常ではないだろう。

Note: アンテナへの進行波電力 P_{FA} のうち ρ^2 は反射され、アンテナに入る正味電力は $P_{FA}(1 - \rho^2)$ となるので、アンテナに正味電力 P_{NA} を注入するために必要となる進行波電力 P_{FA} (W) は、

$$P_{FA} = \frac{P_{NA}}{1 - \rho^2}$$

そのために必要となる方向性結合器への進行波電力 P_{FC} (W) は、

$$P_{FC} = \frac{P_{FA}}{A \cdot A_{DC}} = \frac{P_{NA}}{(A \cdot A_{DC}) \cdot (1 - \rho^2)}$$

方向性結合器の進行波測定ポートへの出力 P_{FM} は、

$$P_{FM} = P_{FC} \cdot C_{FF} = \frac{C_{FF} \cdot P_{NA}}{(A \cdot A_{DC}) \cdot (1 - \rho^2)}$$

一方、アンテナからの反射波電力 P_{RA} (W) は、

$$P_{RA} = P_{FA} \cdot \rho^2 = \frac{\rho^2 \cdot P_{NA}}{(1 - \rho^2)}$$

方向性結合器まで到達する反射波電力 P_{RC} (W) は、

$$P_{RC} = A \cdot P_{RA} = \frac{A \cdot \rho^2 \cdot P_{NA}}{(1 - \rho^2)}$$

方向性結合器の反射波測定ポートへの出力 P_{RM} は、

$$P_{RM} = P_{RC} \cdot C_{FR} = \frac{C_{FR} \cdot A \cdot \rho^2 \cdot P_{NA}}{(1 - \rho^2)}$$

多くの人は dB で考えるのに慣れていていると思われ、また A などのパラメータは通常は dB で表現されるので、 $1 - \rho^2$ や ρ^2 を dB に変換して dB で計算するようにした方がわかりやすいかも知れない。

3.3.3 DUT とハーネスの配置

試験セットアップの例を図 18 と図 19 に示す。

低圧電源の場合、DUT は少なくとも厚さ 50 mm の低誘電率 ($\epsilon_r < 1.4$) の台でグラウンド・プレーン上から離して配置する (図 18)。この台は、送信アンテナのどの部分もグラウンド・プレーンから 50 mm 以内に近付かないような厚さのものとする。

高圧電源の場合、DUT はグラウンド・プレーン上に直接配置する (図 19)。^{†31}

いずれの場合も、テスト・ハーネスは厚さ 50 ± 5 mm の低誘電率 ($\epsilon_r < 1.4$) の台でグラウンド・プレーン上から離して配置する。

人が近くに居る状態で (例えば送信アンテナを手で持って) 試験を行なう場合、相互作用の制限のために送信アンテナと人のあいだを 500 mm 以上離すことが推奨される。^{†32}

3.3.4 DUT とコネクタへの照射

1. 試験法 1 — セル毎の照射

- 試験対象となる DUT の面やコネクタを使用するアンテナに応じて表 3 で示した寸法 $d \times d$ 毎のセルに区切る。
- セルの中央、表面から 50 mm の位置に送信アンテナの中心^{†21} を合わせて DUT の面と平行に配置し (図 20 (a), 図 21 (a))、テスト・プランの指定に従って送信アンテナに所定の周波数、変調、正味電力の妨害を注入して 2 秒以上かつ DUT への影響の評価に必要な時間以上 (§2.7) の照射を行なう。
- 送信アンテナを 90° 回転させて同様の試験を行なう (図 20 (b), 図 21 (b))。
- 送信アンテナを次のセルに移動させ、全てのセルについて同様の試験を繰り返す。
- セルの中央にアンテナのエレメントの基準点を合わせて、全てのセルについて同様の試験を繰り返す (図 20 (c), (d), 図 21 (c), (d))。

2. 試験法 2 — 送信アンテナでの掃引

- テスト・プランの指定に従って送信アンテナに所定の周波数、変調、正味電力の妨害を注入する。
- DUT の表面から 50 mm の距離を保ったまま、送信アンテナで試験対象範囲をテスト・プランで規定された速度で掃引する。^{†33}

掃引の方法は述べられていないが、例えば図 22 や図 23 のように送信アンテナの中心^{†21} とエレメントの基準点を結ぶ直線方向の適切な範囲を d 以下の間隔で掃引し、方向を 90° 変えて同様の作業を繰り返せば、試験法 1 と同様の照射範囲をカバーできるであろう。

^{†31} 高圧電源を用いるデバイスが可搬型送信機を近づけられるような場所に取り付けられることは少ないかも知れない。

^{†32} 人体の電磁界への曝露については §4.4 で触れる。

^{†33} 例えば、試験法 1 での照射時間が 2 秒、セルの大きさ $d = 50$ mm の場合、50 mm 当り 2 秒よりも遅い速度で掃引すれば良さそうである。

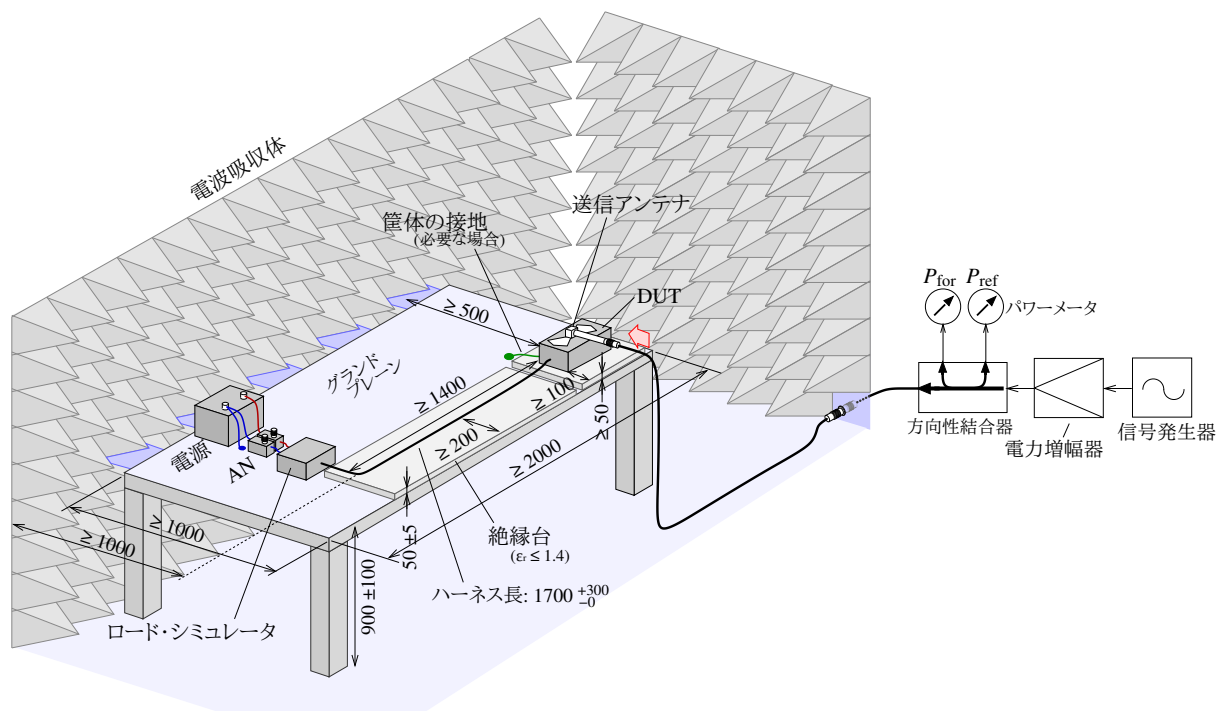


図 18: 試験セットアップの例

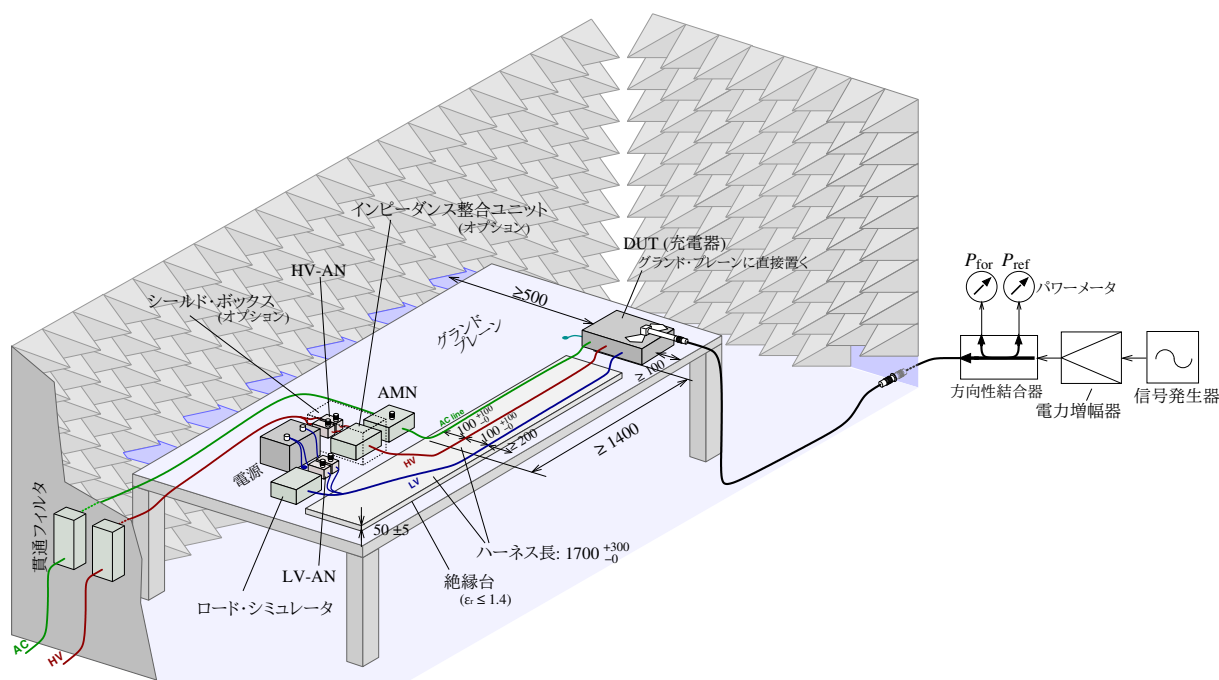


図 19: オンボード AC 充電器の試験セットアップの例

この際、ダイポール・アンテナの場合はアンテナの中心^{†21}が照射範囲の両側の縁から $d/2$ までの範囲となるように掃引すればその範囲をアンテナの中心とエレメントの基準点の双方で照射できる (図 22)。スリーブ・アンテナの場合もアンテナの

中心が照射範囲の縁から $d/2$ となる位置からエレメントの基準点が照射範囲の反対側の縁から $d/2$ となる位置までの掃引を行えばその範囲をアンテナの中心とエレメントの基準点の双方で照射できる (図 23)。

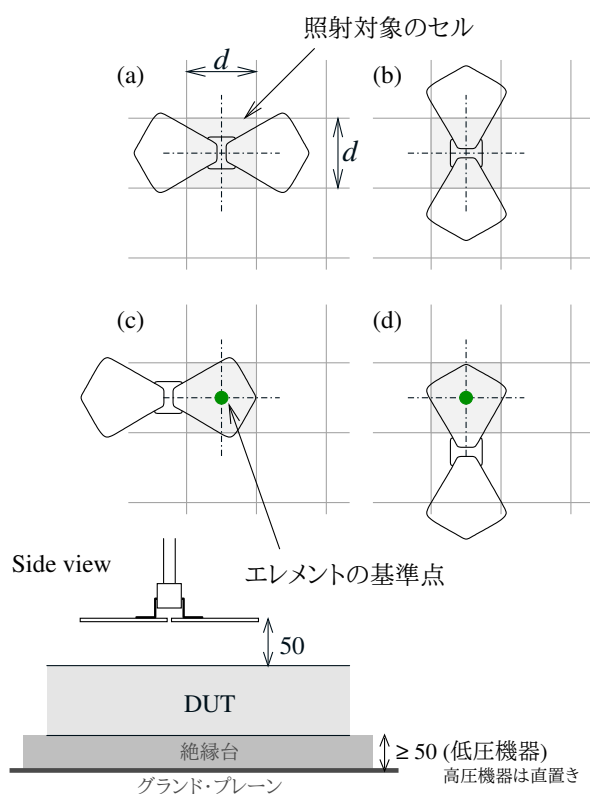


図 20: DUT の試験 — 試験法 1 でのアンテナの配置 (広帯域ダイポール・アンテナの例)

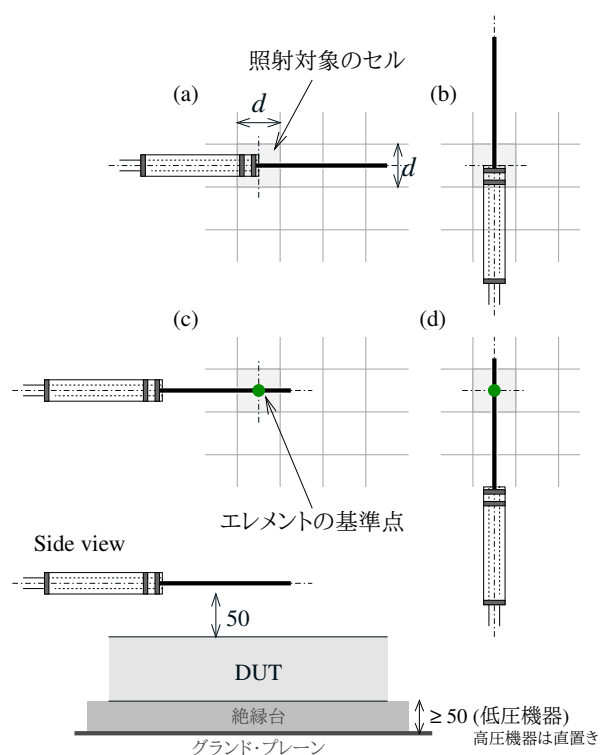


図 21: DUT の試験 — 試験法 1 でのアンテナの配置 (スリーブ・アンテナの例)

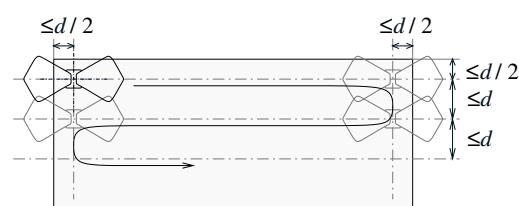


図 22: DUT の試験 — 試験法 2 でのアンテナの掃引の例 (広帯域ダイポール・アンテナの例)

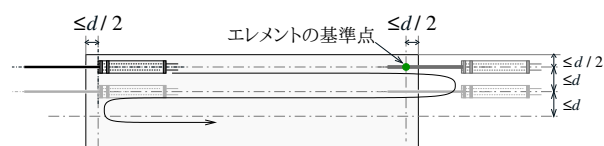


図 23: DUT の試験 — 試験法 2 でのアンテナの掃引の例 (スリーブ・アンテナの例)

3.3.5 ハーネスへの結合

コネクタから 100 mm の位置から始めて、ハーネスに沿って使用するアンテナに応じて表 3 で示した寸法 d 毎の位置について §3.3.4 の試験法 1 と同様に照射を行なう (図 24, 図 25)。照射はコネクタから 300 mm の位置までについて行ない、 $d = 100$ mm の場合はハーネスに沿った 3 箇所、 $d = 50$ mm の場合は 5 箇所での試験を行なうことになる。

あるいは、送信状態とした送信アンテナをハーネスに対して図 24 や図 25 のそれぞれの配置と同様に位置させ、少なくとも上記の方法と同じ範囲をカバーするようにハーネスに沿ってテスト・プランで規定された速度で掃引しても良い。

この規格の Annex C で示されている送信アンテナで中点^{†21}からアンテナの端までが 100 mm を超えるものも少なくない^{†34}が、図 24 (a) や図 25 (a) の配置でそのようなアンテナの中点^{†21}を 100 mm の距離 (送信アンテナによってはより遠くの距離でも) に置こうとした時、DUT の厚みが大きければアンテナが DUT に当たることになりそうである。そのような場合、ハーネス、DUT、及び/もしくは送信アンテナの位置を変えるなどの対応を考えることも必要となるかも知れない。

^{†34} 例えば広帯域ダイポール・アンテナで 120 mm (Figure C.2)、380~390 MHz のスリーブ・アンテナで 200 mm 程度 (Table C.1) となっている。

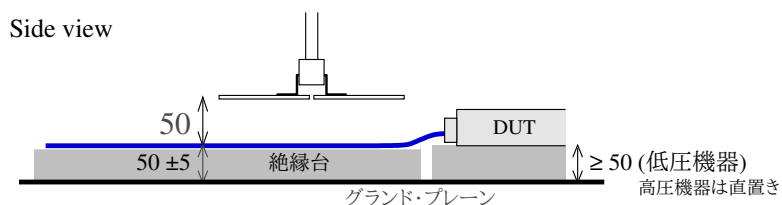
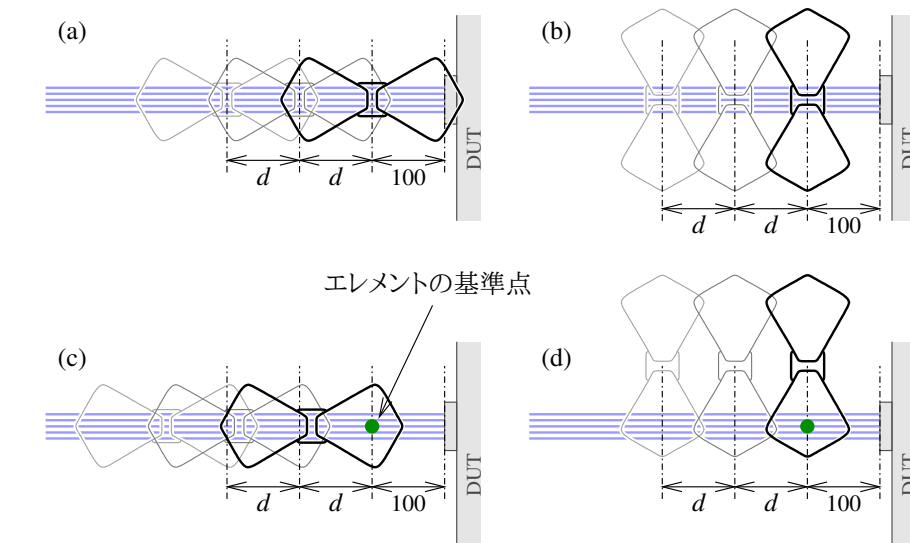


図 24: ハーネスへの結合 — アンテナの配置 (広帯域ダイポール・アンテナの例)

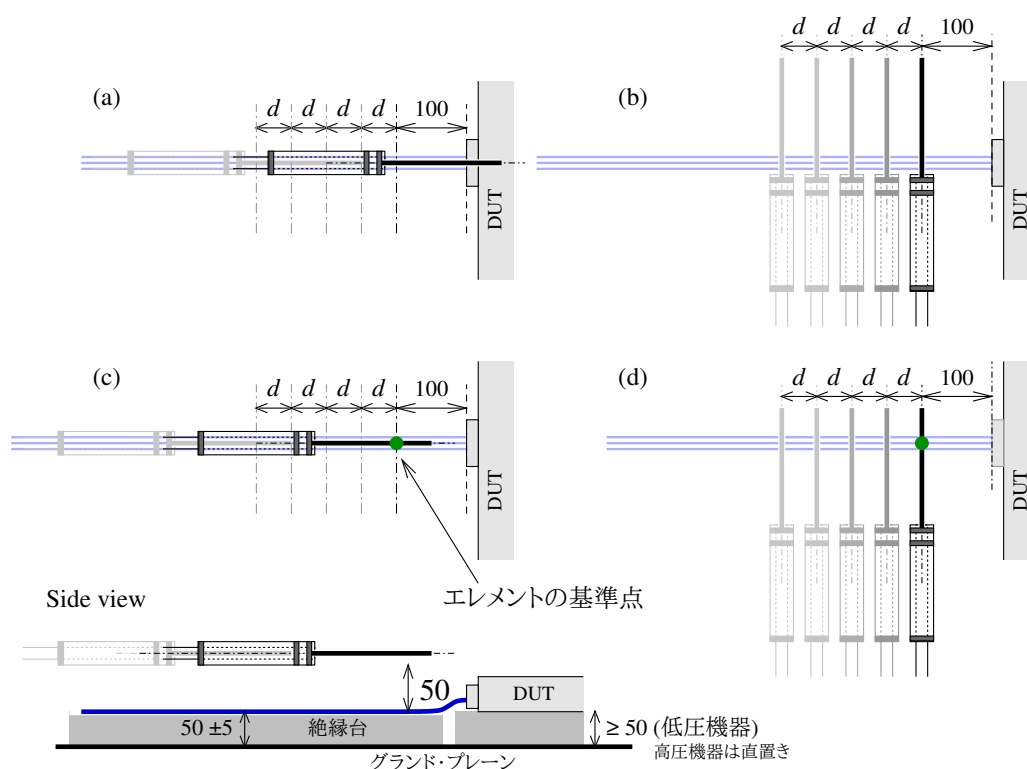


図 25: ハーネスへの結合 — アンテナの配置 (スリーブ・アンテナの例)

4 補足

4.1 試験レベルの例

本稿で述べたような送信アンテナを用いた試験要求の一部として記載されたものではないが、この規格の Table B.1^{†25} では典型的な可搬型送信機の周波数、出力、変調の例が示されている (表 4)。

また、規定として示されているわけではなく参考扱いとなっているものの、Table D.1 では表 5 のような試験レベルの例 (変調の情報は含まない) が示されている。

図 26 にこれらを図示するが、Table D.1 の試験レベルの例と Table B.1 の典型的な送信機の出力とは単純に対応しているわけではなく、また Table D.1 の試験レベル IV として Table B.1 の典型的な送信機の出力以上となるような値が示されているわけでもない。

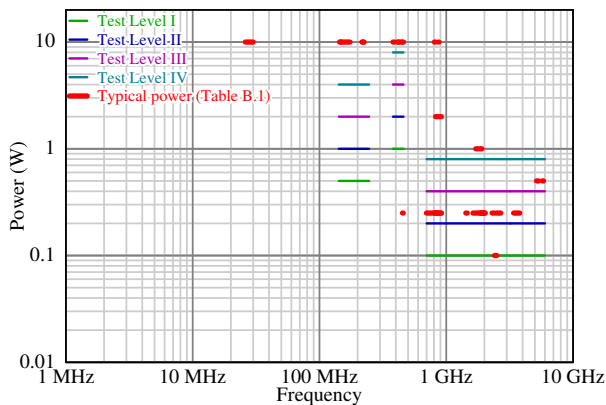


図 26: 典型的な可搬型送信機の出力と試験レベルの例 (ISO 11452-9^{†1} Table B.1、Table D.1 (informative) に基づく)

試験に際しては、§3.2 で触れたように、試験を行なう周波数、出力 (試験厳しさレベル)、変調は、その他の必要な事項と共に決め、テスト・プランに文書化することが必要となるだろう。

4.2 パワーセンサのパルス応答

パワーセンサの応答をカットオフ周波数 f_{VBW} の単純な一次のフィルタでモデル化できるものと仮定すると、そのステップ入力に対する応答は時定数 $\tau = 1/(2\pi f_{VBW})$ として $v(t) = V(1 - \exp(-t/\tau))$ 、立ち上がり時間 $\tau_r \approx 2.2\tau \approx 0.35/f_{VBW}$ となり、

これは $t = 5\tau$ で最終値の 99 % 強に達することになる。

例えば $VBW = 300 \text{ kHz}$ であれば $\tau \approx 0.53 \text{ } \mu\text{s}$ 、 $t_r \approx 1.2 \text{ } \mu\text{s}$ となる。

このパワーセンサにパルス変調された RF 信号を入力した時、例えばパルス幅 t_w が $10 \text{ } \mu\text{s}$ 程度の場合、それに対するセンサの応答のエンベロープは著しく鈍ったものとなるもののパルスの後半はほぼ平坦で本来の電力の 99.9 % 以上まで上がる計算となり、従ってピーク・エンベロープ・パワーとしてはほぼ正確な値が報告されることが期待される (図 27 (a))。従って、パルス幅がこの程度以上の場合、パルスのエンベロープ、パルス幅、あるいは立ち上がり時間などを観測したい場合は VBW の高いパワーセンサが必要となるであろうものの、ピーク・エンベロープ・パワーのみを知りたいのであれば VBW が 300 kHz のパワーセンサも許容できると考えて良さそうである。

但し、パワーセンサ自身の応答が十分に早くてもその後でのアベレージングなどによって応答速度が低下する可能性もあるので、そのような設定にも注意した方が良いでしょう。

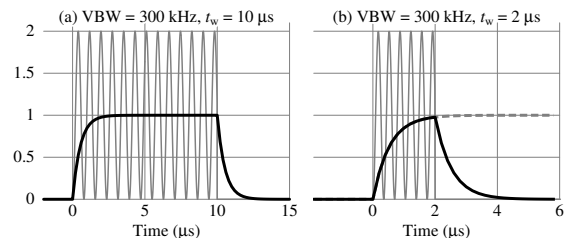


図 27: パワーセンサのパルス応答のイメージ

パルス幅が短くなるとそれに応じてセンサの応答のエンベロープの歪みは大きくなる。先と同様に $VBW = 300 \text{ kHz}$ のパワーセンサを考えた場合、パルス幅 $t_w = 1 \text{ } \mu\text{s}$ の場合はパルスの終わりでも本来の電力の 85 %、パルス幅 $t_w = 2 \text{ } \mu\text{s}$ の場合も 98 % 弱程度までしか上がらず、ピーク・エンベロープ・パワーとして報告される値が低くなることが予想される (図 27 (b))。従って、ピーク・エンベロープ・パワーのみを知りたい場合であってもこの程度以下のパルス幅のパルスに対しては VBW が 300 kHz のパワーセンサでは応答が遅すぎ、より VBW の高いパワーセンサが必要と考えた方が良さそうである。

必要な場合、例えばパルス幅を短くしたり長くした時に測定値が変化しないかどうかを、あるいは

Transmitter designation	Frequency [MHz]	Power ^a [W]	Typical transmitter modulation	Test modulation
10 m	26 to 30	10(RMS)	Telegraphy, AM, SSB FM	AM 1 kHz, 80 %
2 m	144 to 148	10(RMS)	Telegraphy, AM, SSB FM	CW
1,25 m	220 to 225	10(RMS)	Telegraphy, AM, SSB FM	CW
Bluetooth, WLAN (data) WIFI	2 400 to 2 500	0,10(Peak)	QPSK	PM 1 600 Hz 50 % duty cycle Or broadband noise of 20MHz by AWG See Annex F
LTE (mobile phone OFDMA & SC-FDMA)	452 to 458 698 to 803 / 807 to 862 / 880 to 915 / 1 427 to 1 463 1 625 to 1 661 / 1 710 to 1 785 1 850 to 2 025 / 2 300 to 2 400 2 496 to 2 690 3 400 to 3 800	0,25(Peak)	OFDM - PSK	PM 1 000 Hz 10 % duty cycle Or broadband noise of 20MHz by AWG See Annex F
IEEE 802.11a (5G WIFI)	5 150 to 5 350 5 725 to 5 850	0,5(Peak)	OFDM - PSK	PM 1 600 Hz 50 % duty cycle Or broadband noise of 20MHz by AWG See Annex F

^a Power levels listed are typical of commercial equipment. However, power levels used during testing with simulated portable transmitters will be dependent on the test antenna used (see [Annex C](#)). Typically, the power levels using the simulated portable transmitter antenna will be higher (see [Annex D](#)).

表 4: 典型的な可搬型送信機の例 (ISO 11452-9^[1] Table B.1 (informative) より抜粋)

周波数帯 (MHz)	試験レベル I (W)	試験レベル II (W)	試験レベル III (W)	試験レベル IV (W)	試験レベル X (W)
142～246	0.5	1	2	4	この文書のユーザー間で合意された特定の値
380～460	1	2	4	8	
700～3200	0.1	0.2	0.4	0.8	
3200～6000	0.1	0.2	0.4	0.8	

表 5: 試験レベルの例 (ISO 11452-9^[1] Table D.1 (informative) より)

パルス幅を様々に変えた時の測定値のカーブを確認すれば、そのパルス幅で測定を正常に行なえていそうかどうかを確認できるであろう。また、可能な場合はエンベロープ・パワーそのものを観測できるパワーメータを用いれば、パワーセンサの応答が適切かどうかを、またパルス変調や振幅変調のパラメータ (パルス変調の場合のパルス幅や周期など) が正しいかどうかを簡単に確認することもできるだろう。

4.3 進行波電力と反射波電力からの正味電力や反射係数の算出

ISO 11452-9:2012 では、§3.3.2 で触れたようにアンテナへの正味電力を進行波電力とあらかじめ VNA で測定された反射係数などのパラメータとから定められるものとしてではなく、試験と同様の系統での進行波電力と反射波電力とから定められるも

のとして述べられていた。

図 17 の系統を仮定すると、

$$P_{FA} = A \cdot A_{DC} \cdot P_{FC}$$

$$P_{RC} = A \cdot P_{RA}$$

であるので、アンテナへの正味電力 P_{NA} は、

$$\begin{aligned} P_{NA} &= P_{FA} - P_{RA} \\ &= A \cdot A_{DC} \cdot P_{FC} - \frac{1}{A} P_{RC} \end{aligned}$$

で、 $A_{DC} \simeq 1$ ならば

$$P_{NA} \simeq A \cdot P_{FC} - \frac{1}{A} P_{RC}$$

となる。

また、アンテナの反射係数 ρ は、

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{\frac{P_{RA}}{P_{FA}}} \\ &= \sqrt{\frac{\frac{1}{A} P_{RC}}{A \cdot A_{DC} \cdot P_{FC}}} \\ &= \sqrt{\frac{A_{DC}}{A^2}} \sqrt{\frac{P_{RC}}{P_{FC}}} \end{aligned}$$

で、 $A_{DC} \simeq 1$ ならば

$$\rho \simeq \frac{1}{A} \sqrt{\frac{P_{RC}}{P_{FC}}}$$

となる。

4.4 人体の電磁界への曝露

この試験を人が近くにいる状態で行なう場合 (放射を行なったままで送信アンテナを手で動かそうとする場合には当然そうなる) には人もその電磁界に曝されることになる。この試験は人の近傍で用いられる可搬型送信機の模擬を意図したものであり、それほど強力な電磁界を放射するわけではないが、起こり得る曝露やそれに対する対応について検討することは必要となるだろう。

参考までに、図 28 に、この規格の Table D.1 (informative) で例示されている試験レベル IV の出力を放射している送信アンテナから $d = 0.5 \text{ m}$ の距離における電界強度を $E \simeq 7\sqrt{P}/d$ によって推定したものを、人体の電磁界への曝露の制限に関する ICNIRP のガイドライン [7] で示された参考レベルと対比させる形で示しておく。

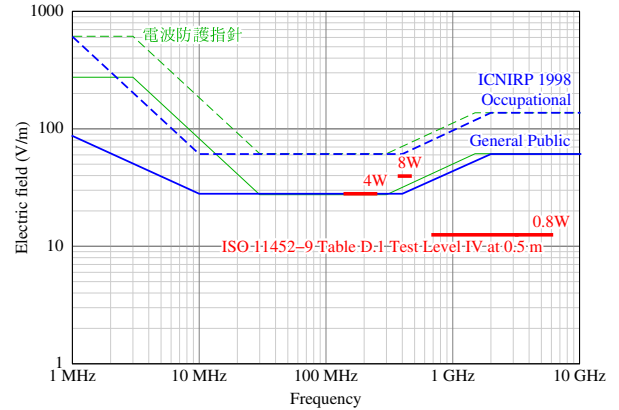


図 28: 近接試験用アンテナからの電界 (推定値) と ICNIRP 参考レベル— 赤のプロットは ISO 11452-9 Table D.1 (informative) で例示されている試験レベル IV での送信機出力から $E \simeq 7\sqrt{P}/d$ によって推定した $d = 0.5 \text{ m}$ における電界強度

これからすると、この程度の試験レベルでは、送信状態の送信アンテナを頭部や体幹に過度に近付けない (0.5 m 以上、おそらくは 1 m 程度以上の距離を維持することは難しくないと思われる) ように留意していれば ICNIRP ガイドラインの労働者に対する参考レベルを超えるような曝露を受けるリスクは低そうである。

また、作業中に送信アンテナを偶発的に体に近付けたような場合にはその部分は参考レベルを超えるような電界に曝される可能性もあるであろうし、起こり得る曝露とその影響に関してより詳細な分析が必要と判断されるかも知れない。だが、参考レベルがどのように決められたものであるか、試験で放射される電磁界が通常は変調されていること、そしてその曝露がおそらくはごく短時間の、また非常に局所的なものとなることを考えると、その場合でも ICNIRP ガイドラインの労働者に対する基本制限を超える曝露を受ける可能性は低そうである。

4.4.1 ISO 11452-9:2012 からの主な変更点

- 周波数範囲の 26 MHz～5.85 GHz から 142 MHz～6 GHz への変更
- 送信アンテナの追加や削除
- 市販の送信機を用いた試験の削除 (市販の送信機を用いた試験への言及は Annex B (informative) で追加試験として残されている)
- 広帯域の妨害の使用への言及の追加

- 高圧電源に接続される装置の試験に関連する記載の追加
- 正味電力を進行波電力と反射波電力から求めるのではなくあらかじめ測定された反射係数などのパラメータから求めるようになった

5 参考資料

- [1] ISO 11452-9:2021, *Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 9: Portable transmitters*
- [2] ISO 11452-1:2015, *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.unecce.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>
- [5] ISO 11452 シリーズの概要, 株式会社 e・オートマ, 2014–2020,
<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] 人体の電磁界への曝露の制限 — ICNIRP ガイドライン、IEEE C95.1、電波防護指針などについて, 株式会社 e・オートマ, 2021,
<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [8] *Impact of Mismatch Loss on Mobile Phone Simulation for Automotive Testing*, R. Keith Frazier and Peng Peng, 2015 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal Integrity, doi: [10.1109/EMCSI.2015.7107680](https://doi.org/10.1109/EMCSI.2015.7107680)
- [9] JLR-EMC-CS v1.0 Amendment 4, *Electromagnetic Compatibility Specification For Electrical/Electronic Components and Subsystems*, Jaguar Land Rover, 2015,
<http://emc.jaguarlandrover.com.edgesuite.net/docs/Downloads.htm>