

ISO 11452-5 の概要 — 車載機器のイミュニティ試験 (ストリップライン法)

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2024 年 11 月 28 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)	2
2.2	AN, AMN, AAN	3
2.2.1	AN (LV-AN)	3
2.2.2	HV-AN	5
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 11452-5	9
3.1	参照規格	9
3.2	試験環境	10
3.3	ストリップライン	10
3.3.1	構造	10
3.3.2	周波数範囲	10
3.3.3	電界強度	10
3.4	電界強度の設定	10
3.4.1	計算法	10
3.4.2	電界測定法	12
3.5	試験	12
3.5.1	ハーネスへの印加	12
3.5.2	DUT への印加	12
3.5.3	DUT とハーネスへの印加	12
4	補足	12
4.1	ストリップライン	12
4.1.1	特性インピーダンス	12
4.1.2	ストリップラインの検証	15
4.1.3	電磁界の分布	16
4.1.4	高次モード	16
4.2	類似の試験	17
5	参考資料	17

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 11452-5^[1] で定められたストリップライン法の概要を述べる。

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) をストリップライン内に置いて電磁波を照射する、あるいはハーネスをストリップライン内に引いてハーネスに妨害を印加するために用いることができるが、寸法の制約もあり、主にハーネスへの妨害の印加に用いられる。

この規格は 10 kHz~400 MHz の周波数範囲をカバーし、しばしば ISO 11452 シリーズの他の規格、例えば ISO 11452-2 と組み合わせて用いられる。

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 11452-5:2002 (ed. 2)^[1] について解説する。

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。



図 1: ストリップラインの例 (写真は Teseq 社提供)

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] 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^{†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。

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。

^{†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} 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。

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} 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^{†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

^{†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

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 mΩ 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 50 Ω 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。

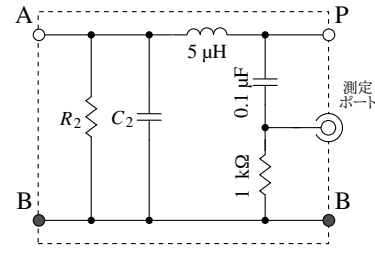
2.2.1 AN (LV-AN)

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 μH/50 Ω AN、あるいは単に 5 μH 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 50 Ω 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^{†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。



AN	C_2	R_2
AN (LV-AN)	1 μF	—
HV-AN	0.1 μF	1 MΩ

図 2: LV-AN, HV-AN の原理

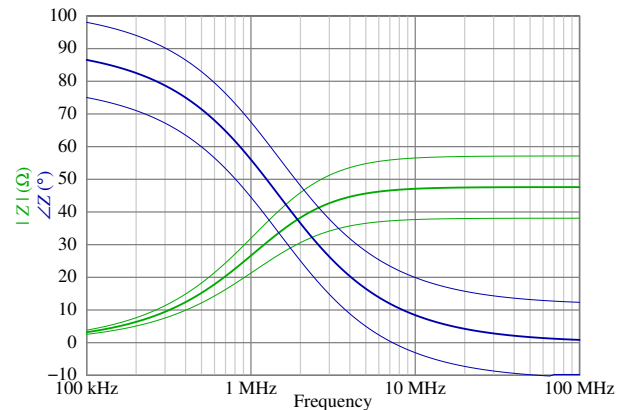


図 3: 5 μH/50 Ω AN のインピーダンス Z_{PB} (測定ポートを 50 Ω で終端、端子 A-B を短絡した状態での計算値)

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)

^{†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。

電源線用 AN, AMN	
LV DC 電源線	AN (LV-AN; 5 μ H / 50 Ω) — ISO 11452-1 B.2.1 (図 2)
HV DC 電源線	HV-AN (5 μ H / 50 Ω) — ISO 11452-1 B.2.2 (図 2) [†]
AC 充電ライン	AMN (50 μ H / 50 Ω) — 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)

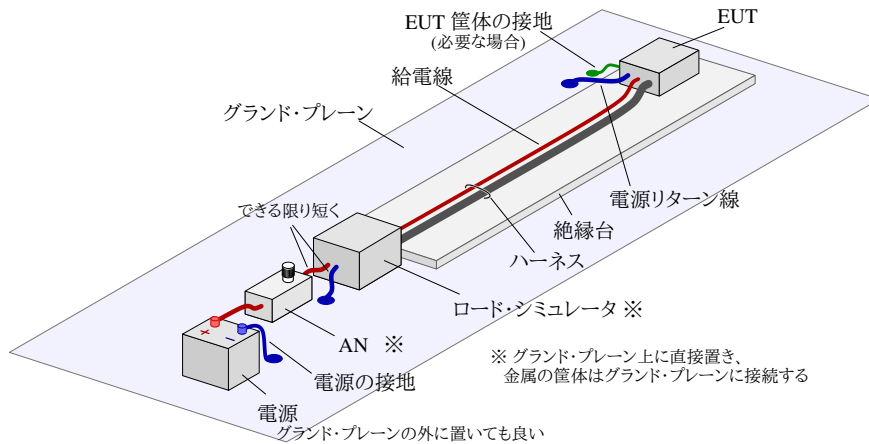


図 4: ローカルでの接地

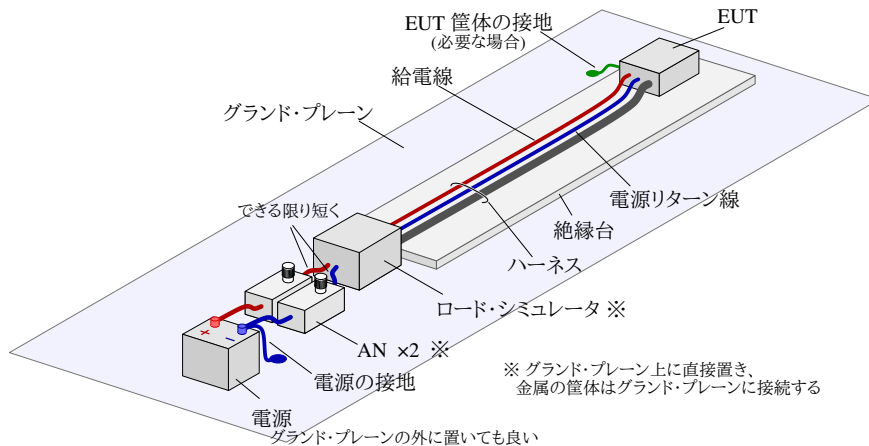


図 5: 遠隔での接地

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

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

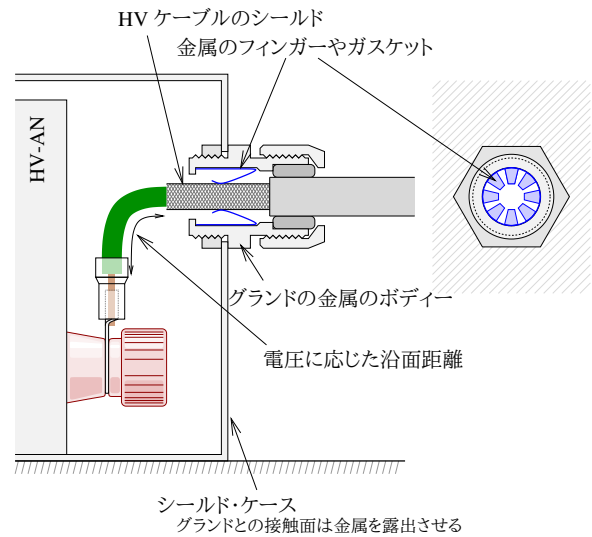


図6: HV ケーブルの HV-AN への接続の例 — ケーブルのシールドをケーブル・グランドの金属のフィンガーなどを介してシールド・ケースに 360° 接続する

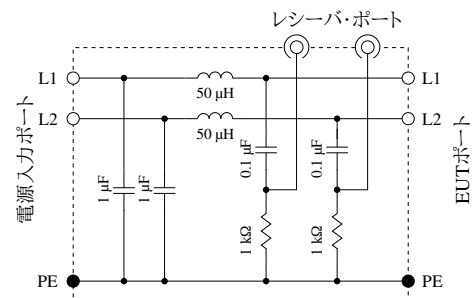


図7: AMN ($50 \mu\text{H} / 50 \Omega$) の原理 — 単相電源用

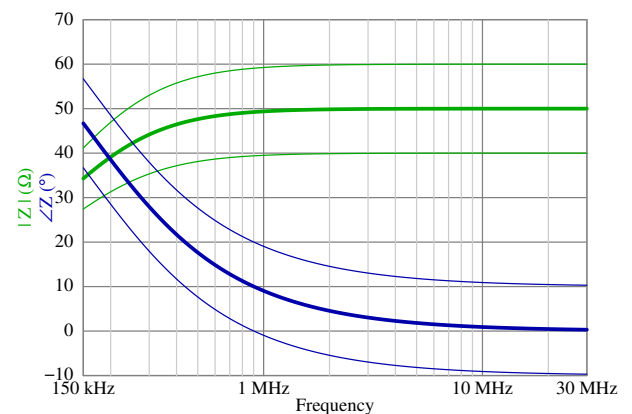


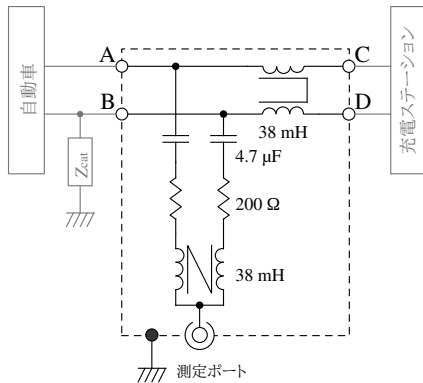
図8: AMN ($50 \mu\text{H} / 50 \Omega$) のインピーダンス

^{†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想される。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。

能を持たない^{†8}が、その他の AAN (図9, 図11) は 150Ω 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

^{†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。



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

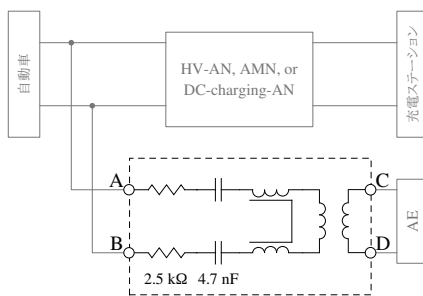


図 10: AAN (電源線上の PLC) の原理

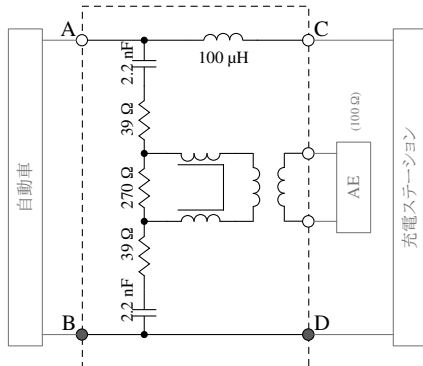


図 11: AAN (コントロール・パイロット上の PLC) の原理

(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

の筐体に入れら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

^{†9} ロード・シミュレータについては [7] で解説している。

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

围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、 $t_{on} = 577 \mu\text{s}$ 、周期 = $4\,600 \mu\text{s}$ (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
- パルス変調 2 (PM 2)
 - レーダー・パルスを模擬する $t_{on} = 3 \mu\text{s}$ 、周期 = $3\,333 \mu\text{s}$ (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)

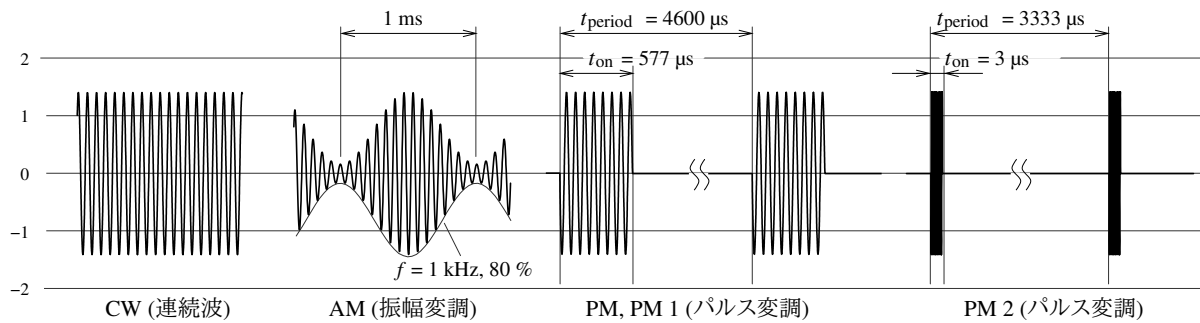


図 12: 変調

2.8 ドウェル・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^{†10}の挙動を確認する。この時間 (ドウェル・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 (例えばセンサ入力の時定数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。

2.9 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。

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。

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)

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。^{†11}

どの機能がどの判定基準に適合しなければならない

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

^{†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。

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 11452-5

3.1 参照規格

ISO 11452-5:2002^[1] は ISO 11452 シリーズの他の規格と共通するような事項 (§2) について ISO 11452-1^[2] を日付なしで参照している。

ISO 11452-1 の参照は日付なしとなっているため、規定上は ISO 11452-1 の最新版が参照されることになるだろうが、ISO 11452-5:2002 はしばしば ISO 11452-1:2005(+A1:2008) と組み合わせて用いられている。また、ECE R10.06^{[3][4]} は ISO 11452-5:2002 とともに ISO 11452-1:2005+A1:2008 を参照している。

ISO 11452-1 の版の試験の実施への影響は限定的ではあるものの、いずれの版を適用する場合もテスト・プランには適用する ISO 11452-5 と ISO 11452-1 の双方の版を明記すると良いだろう。

3.2 試験環境

この試験で用いられるストリップライン (§3.3) はシールドされておらず、周辺にも強い電磁界が放射されるため、試験は電波暗室やシールド・ルームで行なうことが必要となる。

シールド・ルームでの試験の場合は壁からの反射の影響が懸念されることもあるだろうが、そのような場合は壁からの反射の影響の低減のためにストリップラインと壁のあいだに電波吸収体 (必ずしも試験周波数範囲の下限までの周波数で高い反射減衰量を持つものでなくても良い) を置くことができる。

3.3 ストリップライン

3.3.1 構造

この規格ではこの試験で使用するストリップラインの例として 50 Ω (図 13) と 90 Ω (図 14) のストリップラインの 2 つが示されている。これらのストリップラインは規定ではなく情報扱いとなっているが、通常はこのいずれかに準じたストリップラインのみが用いられるであろう。

これらの 50 Ω ストリップラインと 90 Ω ストリップラインはいずれもグランド・プレーンの上 150 mm の高さにアクティブ導体を配置したものであるが、50 Ω ストリップラインと 90 Ω ストリップラインとでは特性インピーダンスを 50 Ω や 90 Ω に合わせるように異なる幅のアクティブ導体を用いられる。

アクティブ導体の片端にはテーパ部を介して妨害の注入のための同軸コネクタが取り付けられている。この同軸コネクタに接続される電力増幅器や同軸ケーブルなどは 50 Ω のものとなり、90 Ω ストリップラインは整合の改善のために整合回路網を介して接続されることがある。

アクティブ導体の反対側は同様にテーパ部を介して同軸コネクタを取り付けて同軸終端器で終端できるようにするか終端抵抗を組み込むことができ、この規格で示されている 50 Ω ストリップラインは前者、90 Ω ストリップラインは後者となっている。

3.3.2 周波数範囲

この規格は 10 kHz~400 MHz の周波数範囲の適用が意図されており、市販のストリップラインはし

ばしば 1000 MHz までの周波数範囲への対応が謳われている。

だが、50 Ω ストリップライン (図 13) は 200 MHz 程度以上では高次モード (§4.1.4) を発生して試験に好ましくない影響を与える可能性が考えられるので、200 MHz までの使用に制限することが望ましいかも知れない。

90 Ω ストリップライン (図 14) は 400 MHz までの周波数範囲での高次モードの発生はない。

一方、ストリップラインは原理的に下側のカットオフ周波数はなく、周波数範囲の下限については懸念とならない。

3.3.3 電界強度

ストリップライン内の電界強度 $|E|$ (V/m) は、ストリップラインのアクティブ導体とグランド・プレーンのあいだの高さを h 、特性インピーダンスを Z 、ストリップラインに注入された正味電力を P として、

$$|E| = \frac{\sqrt{P \times Z}}{h}$$

から求めることができる。^{†12}

従って、図 13 で示した 50 Ω ストリップラインの場合、僅か 4.5 W の正味電力で 100 V/m を発生させることができる。

3.4 電界強度の設定

試験に際しては、ストリップラインの片側のコネクタに電力増幅器から高周波電力が注入され、ストリップライン内を伝搬した後、反対側の終端器で吸収される。

ストリップライン内の電界強度は次のいずれかの方法で設定できる。

3.4.1 計算法

試験レベル E (V/m)、ストリップラインの特性インピーダンス Z (Ω)、ストリップラインのアクティブ導体とグランド・プレーンのあいだの高さ h (m) から、

$$|E| = \frac{\sqrt{P \times Z}}{h}$$

^{†12} 低周波で考えれば、 $P = V^2/Z$ で、これは単純に $E = V/h$ となる。

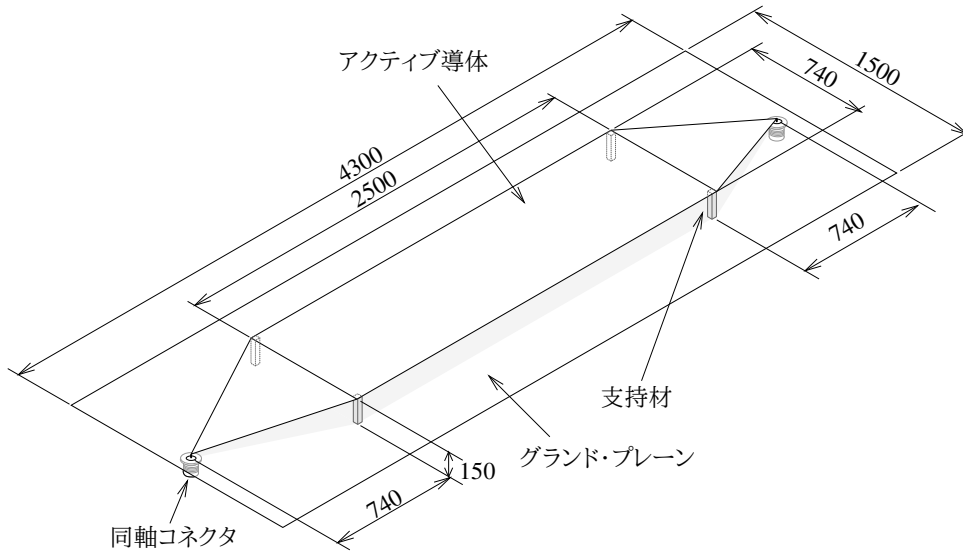


図 13: 50 Ω ストリップライン

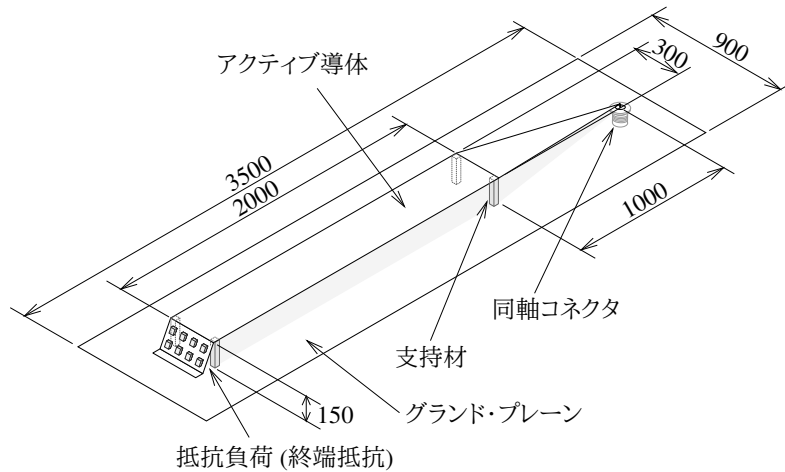


図 14: 90 Ω ストリップライン

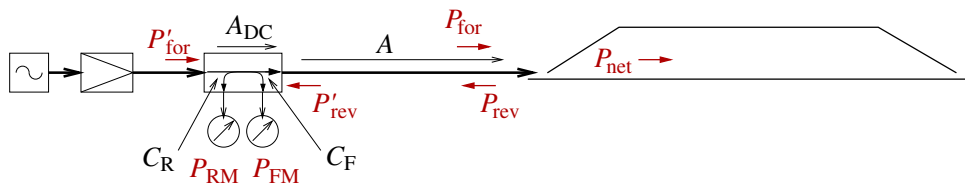


図 15: 試験系統のパラメータ

の関係を用いて、すなわち

$$P = \frac{(E \times h)^2}{Z}$$

によってストリップラインに注入すべき正味電力 P (W) を求める。

正味電力は方向性結合器を用いて測定した進行波電力と反射波電力から求めることができるが、方向性結合器からストリップラインまでの、また方向性

結合器自身の減衰を無視できない場合、その減衰の補正が必要となる。

Note: 図 15 の方向性結合器の位置での進行波電力 P'_{for} と反射波電力 P'_{rev} は、方向性結合器の測定ポートで観測される電力 (P_{FM} , P_{RM})、またそれぞれの結合係数 (C_F , C_R) とから、

$$P'_{for} = P_{FM}/C_F$$

$$P'_{rev} = P_{RM}/C_R$$

ストリップラインの入力ポートにおける入射波電力 P_{for} 、

及び反射波電力 P_{rev} は、

$$P_{\text{for}} = P'_{\text{for}} \cdot A_{\text{DC}} \cdot A$$

$$P_{\text{rev}} = P'_{\text{rev}}/A$$

ストリップラインに注入される正味電力 P_{net} はストリップラインの入力ポートにおける進行波電力 P_{for} から反射波電力 P_{rev} を差し引いたものであるので、

$$P_{\text{net}} = P_{\text{for}} - P_{\text{rev}}$$

$$= P'_{\text{for}} \cdot A_{\text{DC}} \cdot A - P'_{\text{rev}}/A$$

3.4.2 電界測定法

ストリップラインに注入すべき正味電力を計算によって求める代わりに、小型の校正された電界プローブをストリップラインの中央に置き、試験レベルを発生させるためにストリップラインに注入すべき正味電力 P (W) を測定によって求めることもできる (図16)。

電界プローブはストリップラインのアクティブ導体とグランド・プレーンのあいだの高さの 1/3 以下の大きさ、すなわち 5 cm 以下の大きさのものとするべきである。

3.5 試験

3.5.1 ハーネスへの印加

ハーネスへの印加の試験セットアップのイメージを 図17 に示す。

妨害を印加するハーネスは、少なくとも 1000 mm の長さを、アクティブ導体の中心軸の下にそれと平行に、またグランド・プレーンから 50 mm の高さに固定治具を用いて固定する。この固定治具の主な機能は最も良好な再現性を得られるようにハーネスと DUT を位置決めすることであり、それを念頭に作られるべきである。また、ストリップラインの動作への影響を最小限とするため、この固定治具は非常に低誘電率、低誘電正接のものとするのが望ましい。

DUT 自身はその外側、アクティブ導体の縁から 200^{+20}_0 mm の距離に置く。

そのハーネスの反対側の周辺機器はアクティブ導体の縁から 200 mm 以上離して置く。アクティブ領域の外側にも相当の強度の電磁界が発生するので、周辺機器がその電磁界の影響を受ける可能性がある場合、距離をさらに離す、シールドするなどの対応が必要となるかも知れない。

DUT や周辺機器のグランドプレーンへの接続は車両への設置の際と同様とし、車体に直接接続することが意図されていない場合はハーネスと同じ高さの絶縁台の上に置く。

図13 や 図14 で示したようなストリップ・ラインのグランド・プレーンはそれほど大きくないので、DUT や周辺機器などを置くためにはグランド・プレーンを追加することが必要となるかも知れない。

3.5.2 DUT への印加

DUT への印加の試験セットアップのイメージを 図18 に示す。

対象となる DUT をアクティブ導体の下に置き、ハーネスをストリップラインの中心軸に対して直角に引き出す。

この方法での試験ではアクティブ導体とグランド・プレーンのあいだの高さの 1/3、すなわち 50 mm までの高さ (他の面からの照射も行なう場合は 50 mm 角まで) の DUT についてのみ可能である。

3.5.3 DUT とハーネスへの印加

小型の DUT とハーネスの双方をストリップライン内に配置して試験することもできる (図19)。

4 補足

4.1 ストリップライン

4.1.1 特性インピーダンス

図13 や 図14 で示したようなストリップラインの特性インピーダンス Z はその断面の形状から決まり、アクティブ導体の幅を w 、アクティブ導体とグランド・プレーンのあいだの高さを h として、

$$Z = \frac{120\pi}{\frac{w}{h} + 2.42 - 0.44 \frac{h}{w} + \left(1 - \frac{h}{w}\right)^6}$$

から求めることができる。

また、50 Ω ストリップラインの場合、テーパー部の先端近くまで w と h の比率を一定に保つことではほぼその全体にわたって 50 Ω のインピーダンスを維持したままで 50 Ω の同軸コネクタに繋ぎ込むことができる。

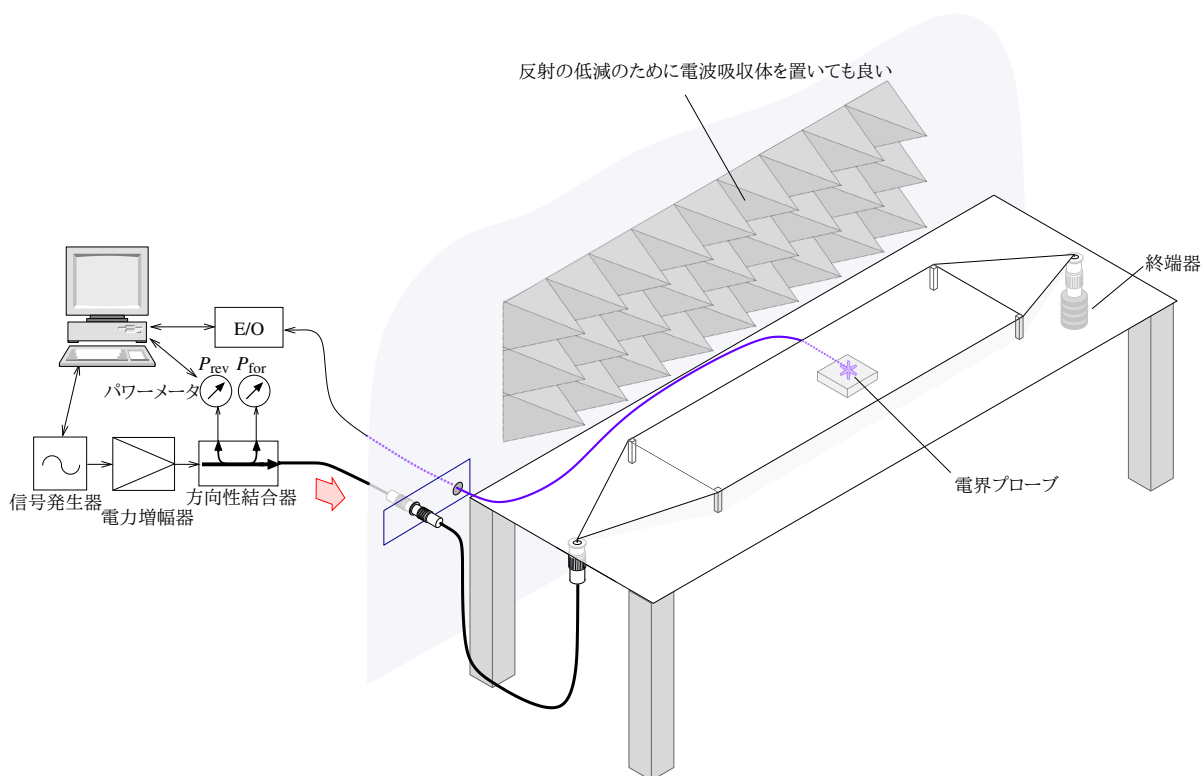


図 16: 電界測定の設定アップの例

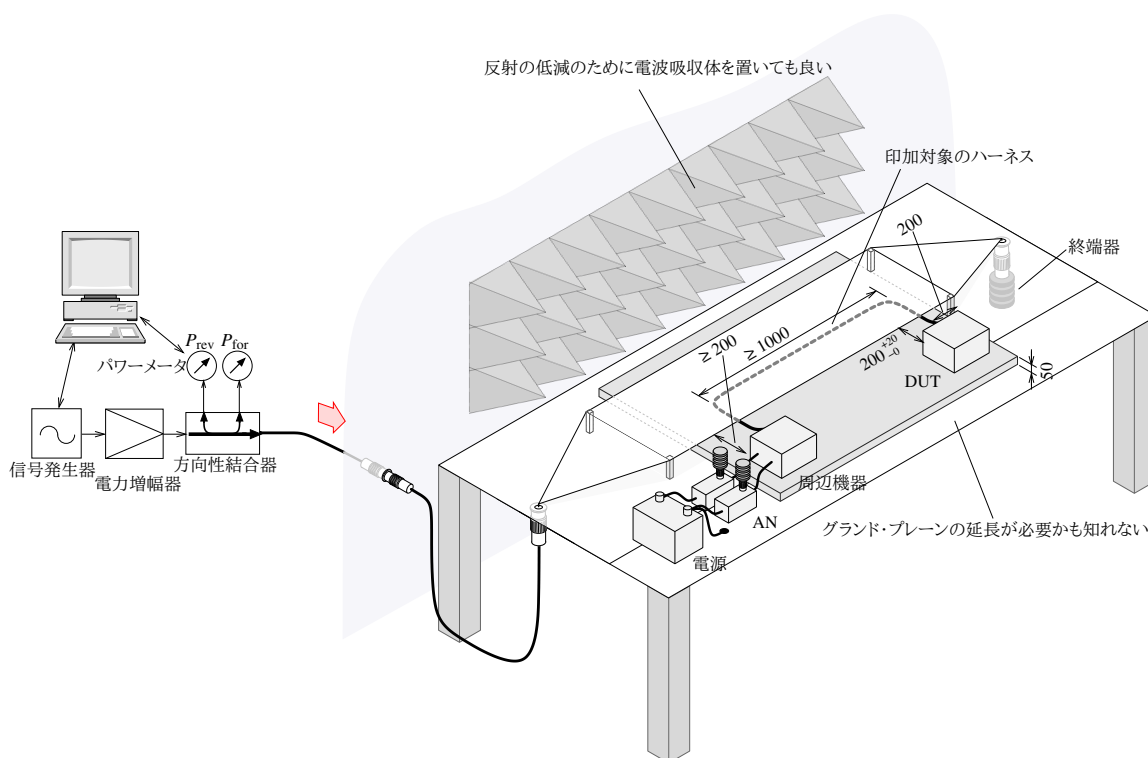


図 17: 試験セットアップの例 — ハーネスへの印加

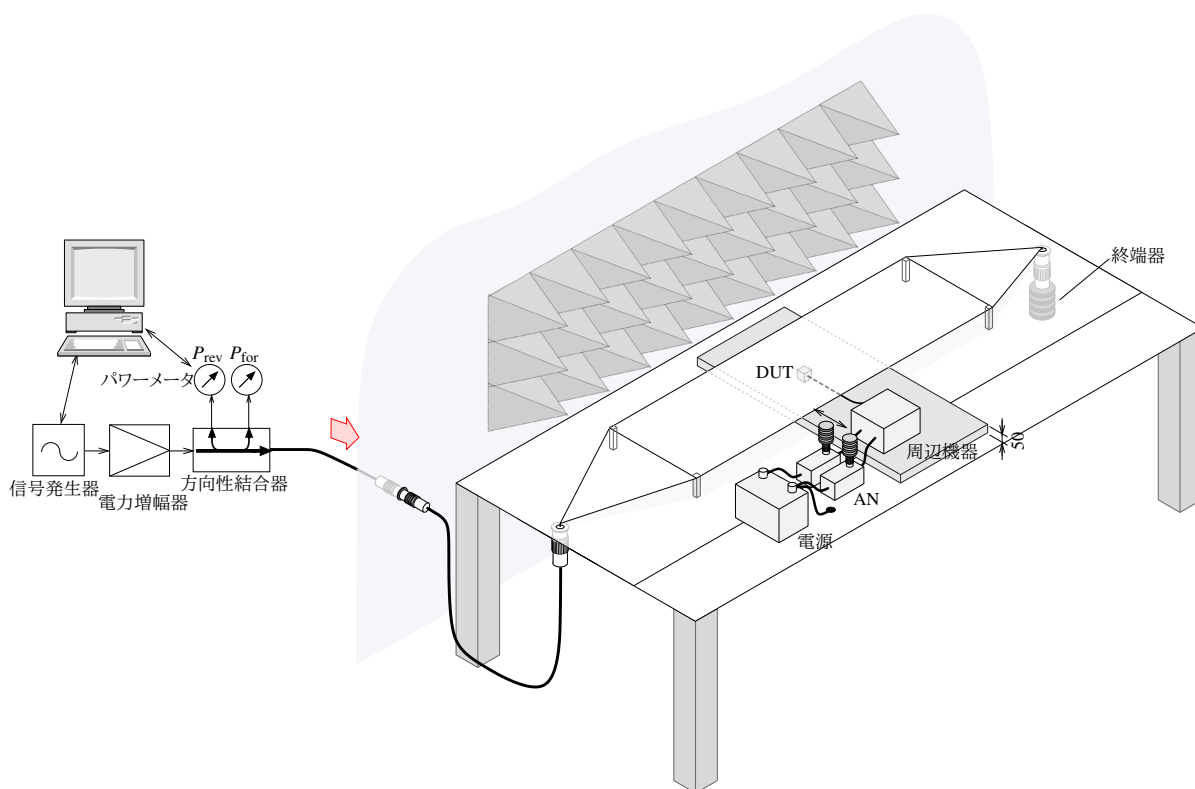


図 18: 試験セットアップの例 — DUT への印加

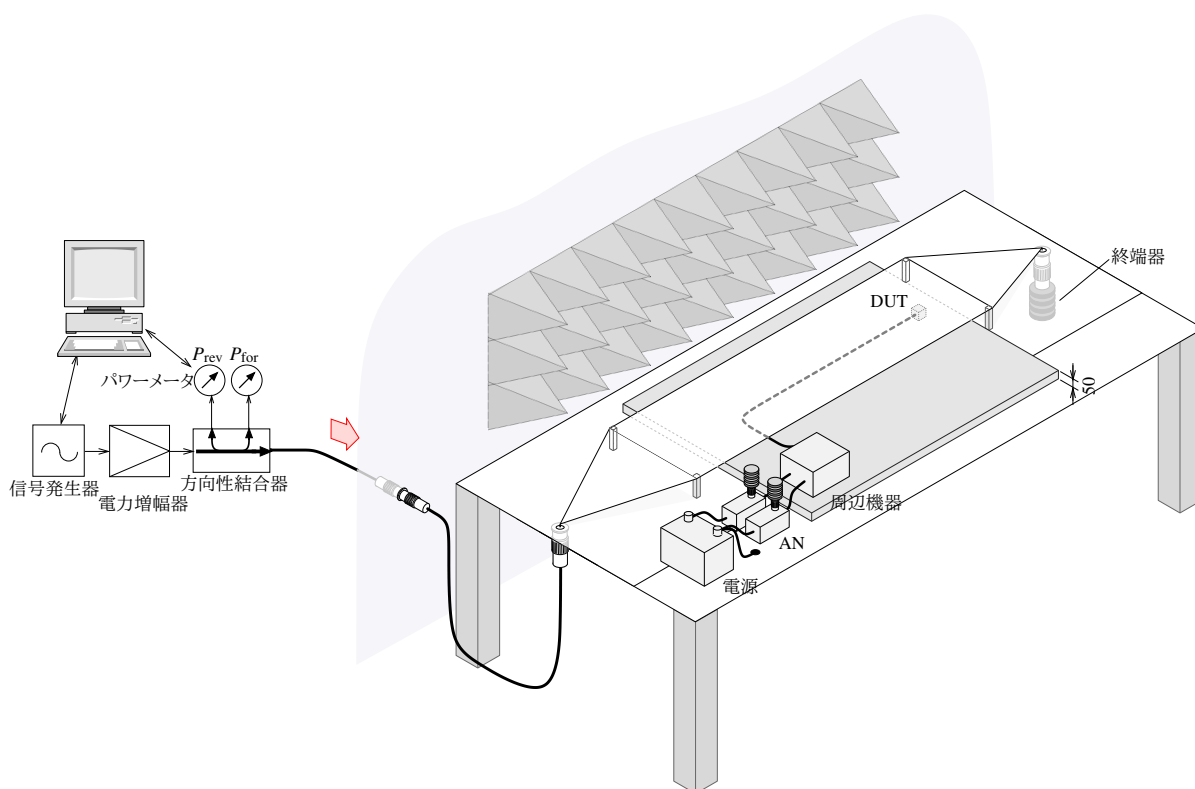


図 19: 試験セットアップの例 — DUT とハーネスへの印加

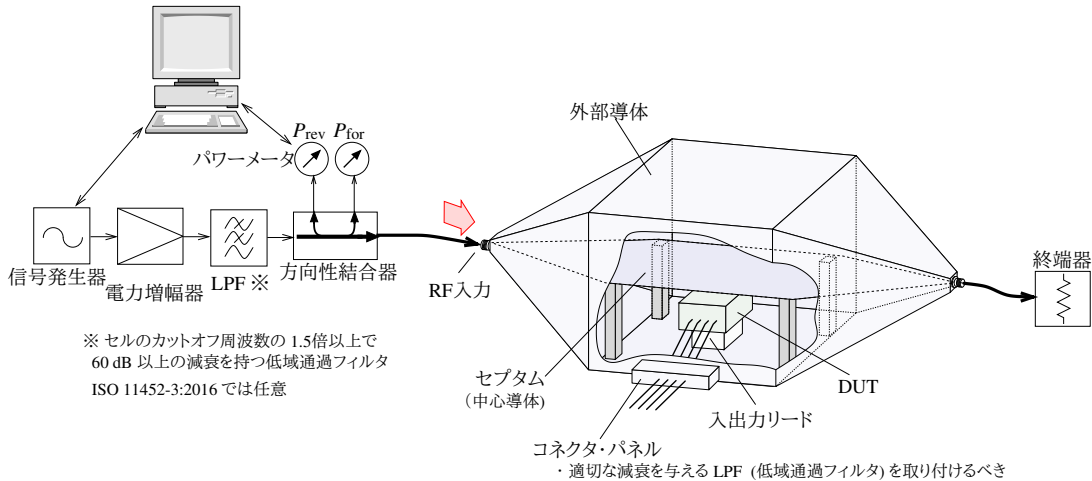


図 20: ISO 11452-3 (TEM セル法) の試験セットアップのイメージ

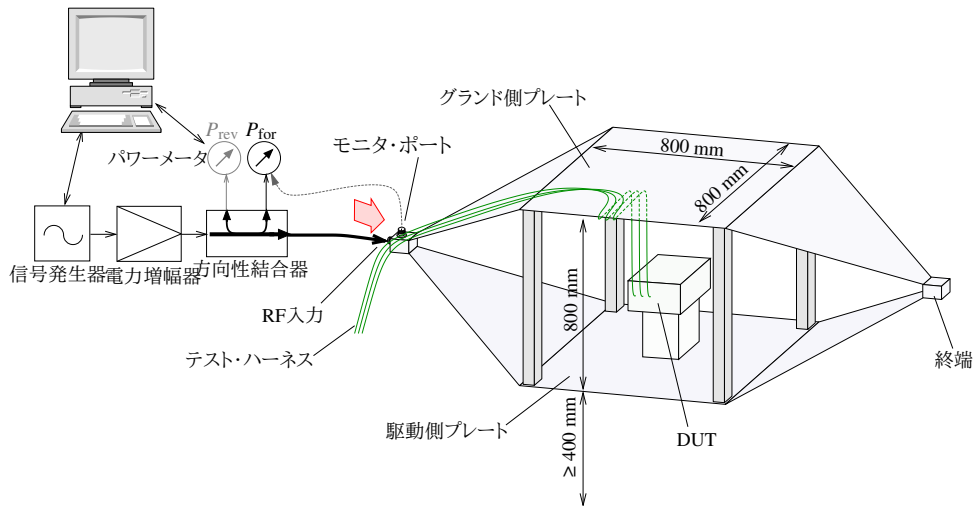


図 21: 800 mm ストリップラインでの試験セットアップのイメージ

4.1.2 ストリップラインの検証

この規格にはストリップラインの検証に関する規定は含まれていないが、市販のストリップラインを入手した場合であっても、使用に先立って、また定期的に特性の検証を行なうことは良い考えであろう。^{†13}

両端に同軸コネクタが取り付けられたストリップライン (図 13) の場合はネットワーク・アナライザを用いて伝送 (S_{21}) とそれぞれの同軸コネクタから見た反射 (S_{11} , S_{22}) を、片側にのみ同軸コネクタが取り付けられたストリップライン (図 14) の場合も

^{†13} このストリップラインは構造が非常に単純で、特殊な部品も必要としないことから、自作を考えることもあるかも知れない。だが、このような場合、それが高周波を取り扱うものであることに特に留意した慎重な設計が、そして測定に基づく細部のチューニングが必要となりそうである。

その同軸コネクタから見た反射 (S_{11}) は容易に測定できる。

50 Ω ストリップラインの場合、使用を意図した周波数範囲で、

- 反射が少ない、すなわち整合が良好である
- 伝送損失が少ない
- 反射と伝送損失に不自然なリップルが見られない
- 製造業者が提供した、あるいは以前に測定されたデータがある場合、そのデータとの有意な違いがない

ならば、そのストリップラインは健全とみなせようである。

90 Ω ストリップラインの場合も同様に確認を行なえるが、図 14 のように同軸コネクタが片側のみにある場合はその側からの反射 (S_{11}) の測定のみが可能で、また整合回路網なしで接続した場合はそもそも不整合となる (整合回路網を用いることもできるが、この場合はその影響が加わる) ため、その判断はやや厄介になることが予期される。

系のどこかで有意な不整合を生じていることが疑われる場合、TDR (時間領域反射率測定法) を用いればどの位置でどのような不整合を生じているかを判断できる。

アクティブ導体と同軸コネクタの接続部や線路内の支持材^{†14}の位置で僅かな不整合を生じることが予期されるが、このような不整合はできる限り抑えられているべきである。

手間は掛かるが、小型の電界プローブを用いてストリップライン内の電界の分布を確認することも有用である。

4.1.3 電磁界の分布

TEM モードにおいては、ストリップラインのアクティブ導体とグランドプレーンのあいだの中央付近の領域にはその電界強度が

$$|E| = \frac{\sqrt{P \times Z}}{h}$$

で示される概ね均一な電磁界が発生することが想定される (図 22, 図 23)。

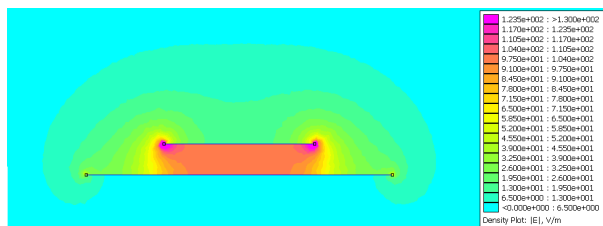


図 22: 50 Ω ストリップラインの電界の分布 (静電界についての有限要素法による推定)

^{†14} アクティブ導体を支えるために線路内に樹脂製の支持材 (機械的強度や加工性の点からソリッドな) が取り付けられることが多いが、このようなものは線路の特性に相当の影響を与える可能性を持つ。影響を小さく抑えるためには、できる限り低誘電率、低誘電正接の素材を用い、かつできる限り小さいものとするのが望ましい。例えばポリアセタール樹脂は比誘電率 3.7、誘電正接 0.007 程度、塩化ビニールやベークライトなどはさらに高い比誘電率や誘電正接を持つが、PTFE であれば比誘電率 2.1、誘電正接 0.0002 程度となり、このような材質の違いもストリップラインの特性への影響に違いを生じることが予期される。

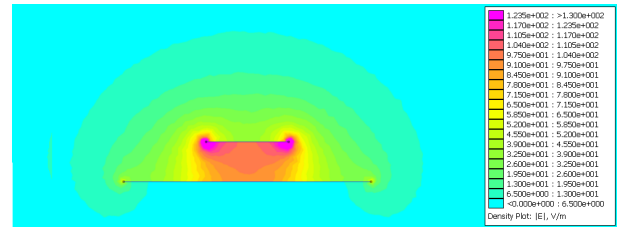


図 23: 90 Ω ストリップラインの電界の分布 (静電界についての有限要素法による推定)

この領域に発生する電磁界の電界はアクティブ導体やグランド・プレーンの面に直交し、磁界はアクティブ導体の面と平行し (そして電界と磁界の双方が電磁界の伝播方向、すなわちストリップラインの中心軸に直交する)、図 17 のようにアクティブ導体の中心軸に沿って引かれたハーネスはその双方に曝されることになる。

また、図 18 のようにストリップライン内に置かれた DUT は電力増幅器側のポートに向けた面からの平面波に曝される形となる。

このような線路のどの範囲を試験に使用するかは規格によって異なるが、一般には、電磁界の均一性の点から、また電磁界への過度の影響を防ぐ点から、その領域の中央付近、幅と高さの双方について 1/3 程度の領域を試験に利用することが多い。

4.1.4 高次モード

ストリップラインの基本モードは TEM モードであり、ストリップラインの形状から決まる高次モードのカットオフ周波数よりも下ではそれ以外のモードはストリップライン上を伝播できない。だが、高次モードのカットオフ周波数よりも高い周波数ではストリップライン内に TE₁₀ などの高次モードが発生し、これが試験に影響を与える可能性がある。

幅 w 、高さ h のストリップライン (マイクロストリップ)^{†15} の場合、

$$f_c \simeq \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}(2w + 0.8h)}$$

から推定できるカットオフ周波数よりも低い周波数では高次モードが発生することはないと考えることができる [8][9]。

^{†15} 伝送線路の分類では、トレースがグランド・プレーンに挟まれたものがストリップラインと、トレース (アクティブ導体) をグランド・プレーン上に引いたものがマイクロストリップと呼ばれる。

この式によれば、50 Ω ストリップライン (図 13) の場合は $w = 0.74$ m、 $h = 0.15$ m で $f_c \simeq 188$ MHz、90 Ω ストリップライン (図 14) の場合は $w = 0.3$ m、 $h = 0.15$ m で $f_c \simeq 417$ MHz という計算となる。

但し、これはこの周波数やそのすぐ上の周波数で高次モードが顕著な影響を生じることを直接意味するわけではない。例えば Schwarzbeck TEMZ 5231 (50 Ω ストリップライン) のデータシートには 220 MHz までは TEM モードの発生に用いることができる旨の記載がある。

4.2 類似の試験

ISO 11452-3 (TEM セル法) では全周が囲い込まれた TEM セルを用いた試験法 (図 20)、ECE R10.06^{[3][4]} Annex 9 Appendix 1 では開放型の 800 mm ストリップラインを用いた試験法 (図 21) が述べられており、伝送線路セルを用いた試験を含む規格はこれらの他にもある。

使用する伝送線路セルや具体的な試験法などはそれぞれの規格によって異なるが、この種の試験では、伝送線路セル内を伝播する電磁波 (主に TEM 波) に試験対象物を曝すという基本原理は共通している。

5 参考資料

- [1] ISO 11452-5:2002, *Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 5: Stripline*
- [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・オータマ, 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・オータマ, 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・オータマ, 2018,

<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>

[8] *Design and Calibration of a TEM Stripline for Electromagnetic Compatibility Testing*, Sezgin Hlavin, 2011

[9] *Microstrip Filters for RF / Microwave Applications*, Jia-Shen G. Hong and M. J. Lancaster, 2004, ISBN: 0471464201