

# ISO 11452-4 の概要 — 車載機器のイミュニティ試験 (BCI 法、TWC 法)

株式会社 e・オートマ 佐藤智典

2023 年 2 月 21 日

## 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>補足</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>共通事項 (ISO 11452-1)</b>	<b>2</b>	4.1	試験レベルの例	23
2.1	電源	2	4.2	BCI 法での妨害レベルの変動	23
2.1.1	低圧 DC 電源	2	4.2.1	電流注入プローブの位置の影響 (置換法)	23
2.1.2	高圧 DC 電源 (ISO 11452-1:2015)	3	4.2.2	ロード・シミュレータのインピーダンスの影響 (置換法)	24
2.2	AN, AMN, AAN	3	4.2.3	ロード・シミュレータのインピーダンスの影響 — コンデンサの効果 (置換法)	26
2.2.1	AN (LV-AN)	3	4.2.4	ロード・シミュレータのインピーダンスの影響 (電力制限付き閉ループ法)	26
2.2.2	HV-AN	4	4.2.5	テスト・ハーネス長の影響 (置換法)	27
2.2.3	AMN	4	4.2.6	ロード・シミュレータの先の装置の影響 (置換法)	28
2.2.4	AAN	5	4.2.7	ロード・シミュレータの先のケーブル長の影響 (置換法)	29
2.3	ロード・シミュレータ	6	4.2.8	DUT の接地ワイヤの影響 (置換法)	29
2.4	テスト・ハーネス	7	4.2.9	ハーネスの導体の束ねの影響	30
2.5	DUT の動作	7	<b>5</b>	<b>参考資料</b>	<b>31</b>
2.6	試験信号の品質	7	<b>1</b>	<b>はじめに</b>	
2.7	試験信号の変調	7		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 11452-4 <sup>[1]</sup> で定められた BCI 法、及び TWC 法の概要を述べる。	
2.8	ドウェル・タイム	8		BCI 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、ハーネスに妨害電流を注入する方法を用いることで比較的低い周波数からの試験に対応しており、しばしば ISO 11452-2 <sup>[9]</sup> (ALSE) や ISO 11452-11 <sup>[5,2]</sup> (リバブレーション・チャンバー) のような高い周波数範囲での試験に適した試験法と組み合わせて、そのような試験法では試験が難しい低い周波数範囲を含む比較的低い周波数範囲の試験のために用いられている。	
2.9	周波数掃引ステップ	8		TWC 法も BCI 法と同様にハーネスに妨害を注入するものであるが、注入の原理は全く異なり、より高い周波数範囲に対応している。	
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			
<b>3</b>	<b>ISO 11452-4</b>	<b>9</b>			
3.1	参照規格	9			
3.2	試験法	10			
3.2.1	背景	10			
3.2.2	BCI 法の原理	10			
3.2.3	TWC 法の原理	11			
3.3	試験場所	12			
3.3.1	シールド・ルーム	12			
3.3.2	グラウンド・プレーン	13			
3.4	試験対象システムのセットアップ	13			
3.4.1	基本的なセットアップ	13			
3.4.2	HV 電源に接続されるシステムのセットアップ (ISO 11452-4:2020)	13			
3.5	BCI 法 — 置換法	18			
3.5.1	校正	18			
3.5.2	試験	19			
3.6	BCI 法 — 電力制限付き閉ループ法	20			
3.6.1	校正	20			
3.6.2	試験	20			
3.6.3	トランスファ・インピーダンスの算出	21			
3.7	TWC 法	21			
3.7.1	校正	21			
3.7.2	試験	22			
3.8	テスト・プラン	22			

この規格の本稿の執筆の時点での最新版は ISO 11452-4:2020 (ed. 5) であるが、ECE R10.06<sup>[3][4]</sup> では ISO 11452-4:2011 (ed. 4) が参照されており、より古い ISO 11452-4:2005 (ed. 3) もまだ使用されることがありそうなことから、本稿では ISO 11452-4:2004 (ed. 3)、及び ISO 11452-4:2011 (ed. 4) にも触れている。

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<sup>[1]</sup>を参照されたい。

## 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<sup>[2]</sup> 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<sup>†1</sup> 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<sup>†1</sup> 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  $\mu\text{s}$  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。

<sup>†1</sup> 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。

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<sup>†2</sup>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<sup>†3</sup>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<sup>†4</sup>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。

<sup>†2</sup> 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。

<sup>†3</sup> 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。

<sup>†4</sup> 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

### 2.1.2 高圧 DC 電源 (ISO 11452-1:2015)

高圧 (HV) DC<sup>†1</sup> 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

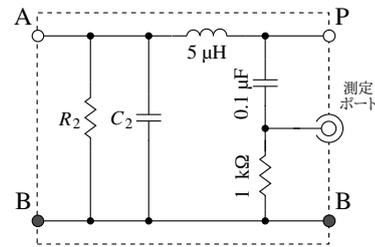
ISO 11452-1:2015 では試験に際して電源などのインピーダンスを管理するためのデバイスとして表 2 に示すものが規定されている。

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 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 1 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 2 に示すようなインピーダンス特性を示すものである。



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

図 1: LV-AN, HV-AN の原理

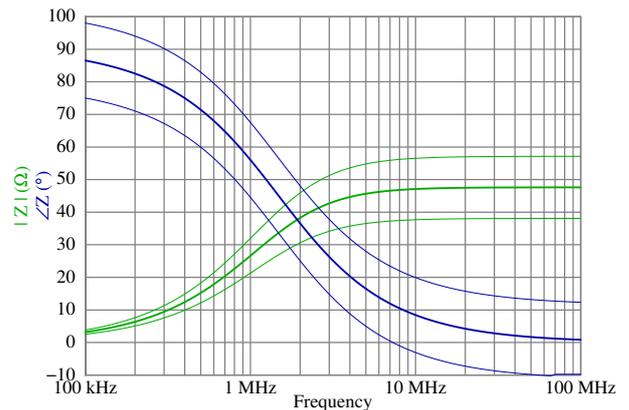


図 2: 5 μH/50 Ω AN のインピーダンス  $Z_{PB}$  (測定ポートを 50 Ω で終端、端子 A-B を短絡した状態での計算値)

AN 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:

電源線用 AN, AMN	
LV DC 電源線	AN (LV-AN; 5 $\mu$ H / 50 $\Omega$ ) — ISO 11452-1 B.2.1 (図 1)
HV DC 電源線	HV-AN (5 $\mu$ H / 50 $\Omega$ ) — ISO 11452-1 B.2.2 (図 1) <sup>†</sup>
AC 充電ライン	AMN (50 $\mu$ H / 50 $\Omega$ ) — CISPR 16-1-2 (図 6) <sup>†</sup>
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 8) <sup>†</sup>
電源線上の PLC	ISO 11452-1 B.4.2 (図 9) <sup>†</sup>
コントロール・パイロット上の PLC	ISO 11452-1 B.4.3 (図 10) <sup>†</sup>

<sup>†</sup> ISO 11452-1:2005(+A1:2008) には含まれない

表 2: AN, AMN, AAN (ISO 11452-1:2015)

- ローカルでの接地 — 電源リターン線が 200 mm 以下の場合<sup>†5</sup>

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 3)<sup>†6</sup>

- 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 4)

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 3) 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 4) 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しなければならず、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。

<sup>†5</sup> 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。

<sup>†6</sup> 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。

## 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 1) やインピーダンス (図 2) の規定は同様だが、図 1 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。<sup>†7</sup>

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に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 5)。

CISPR 25:2021<sup>[6]</sup> や ECE R10.06<sup>[3][4]</sup> 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 6) 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  $\mu$ 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。

<sup>†7</sup> 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、 $C_2$  があろうかどうか) 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  $\mu$ F では約 1  $\Omega$ 、0.1  $\mu$ F では約 10  $\Omega$  で、実際の使用時には  $C_2 = 0.1 \mu$ 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。

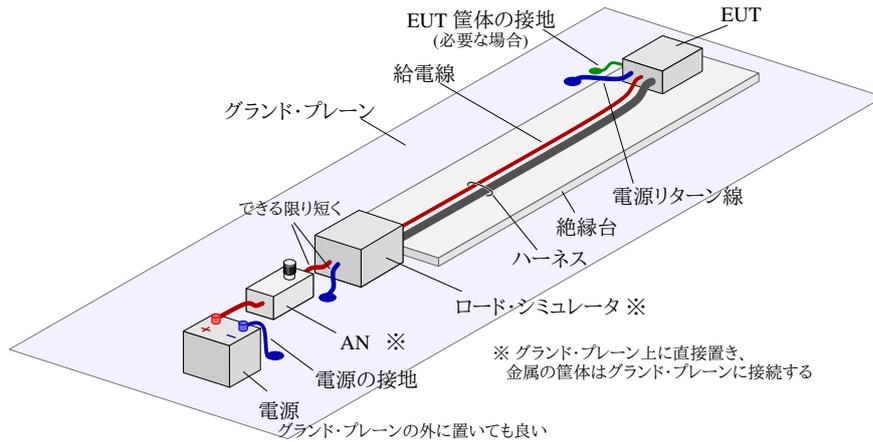


図 3: ローカルでの接地

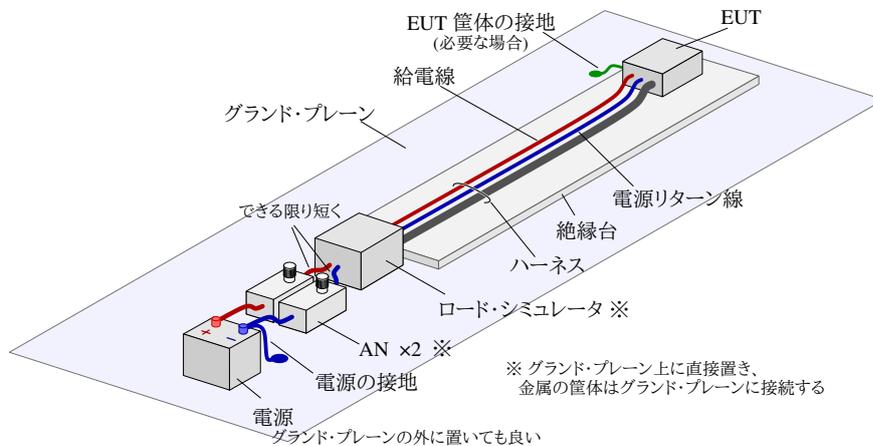


図 4: 遠隔での接地

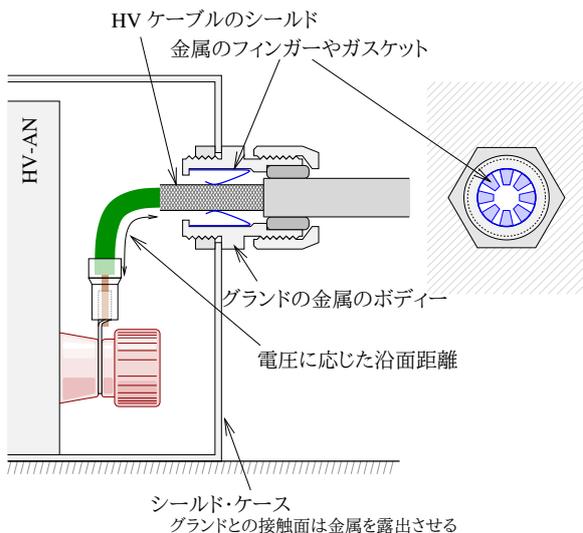


図 5: HV ケーブルの HV-AN への接続の例 — ケーブルのシールドをケーブル・グランドの金属のフィンガーなどを介してシールド・ケースに 360° 接続する

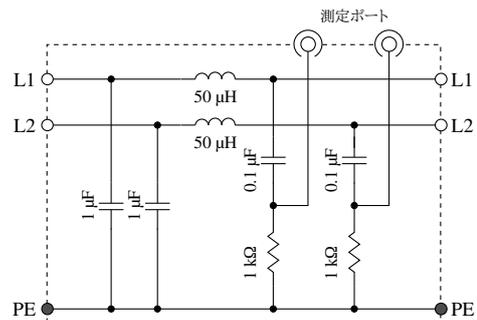


図 6: AMN (50  $\mu$ H / 50  $\Omega$ ) の原理 — 単相電源用

### 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 9) 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能を持

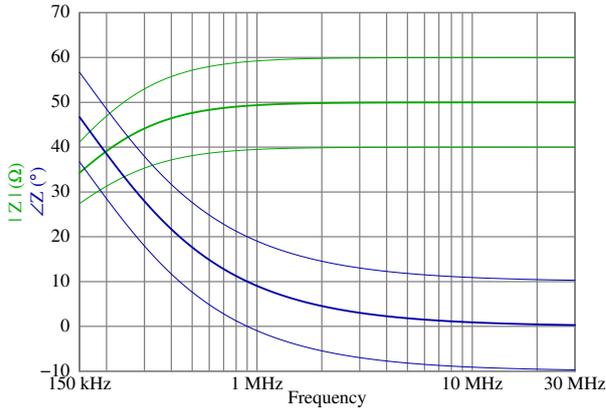
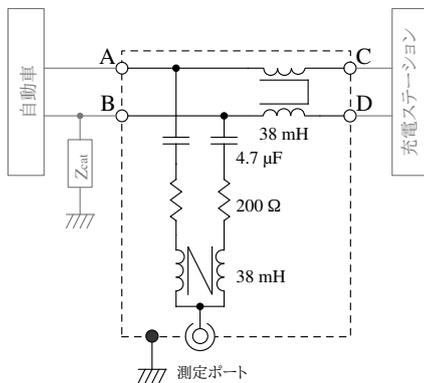


図 7: AMN (50  $\mu\text{H}$  / 50  $\Omega$ ) のインピーダンス



$Z_{\text{cat}}$ : LCL が所定の値となるように平衡度を調整

図 8: AAN (対称信号/制御ポート) の原理 — 2 線 (1 対用)

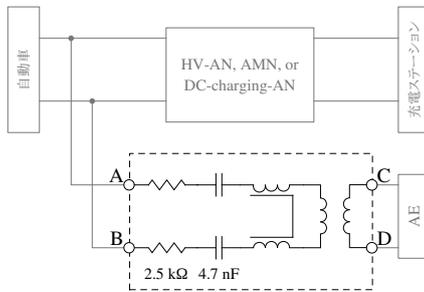


図 9: AAN (電源線上の PLC) の原理

たない<sup>†8</sup>が、その他の AAN (図 8, 図 10) は 150  $\Omega$  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 8) の  $Z_{\text{cat}}$  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。

<sup>†8</sup> 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。

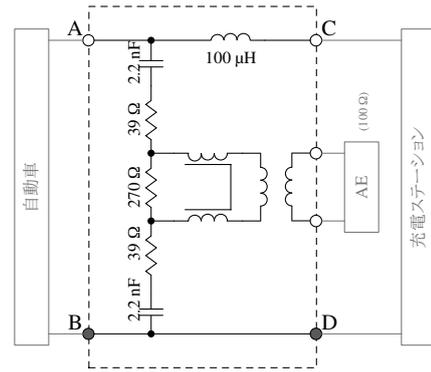


図 10: AAN (コントロール・パイロット上の PLC) の原理

### 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。<sup>†9</sup>

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 2) 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。

<sup>†9</sup> ロード・シミュレータについては [7] で解説している。

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 11):

- 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

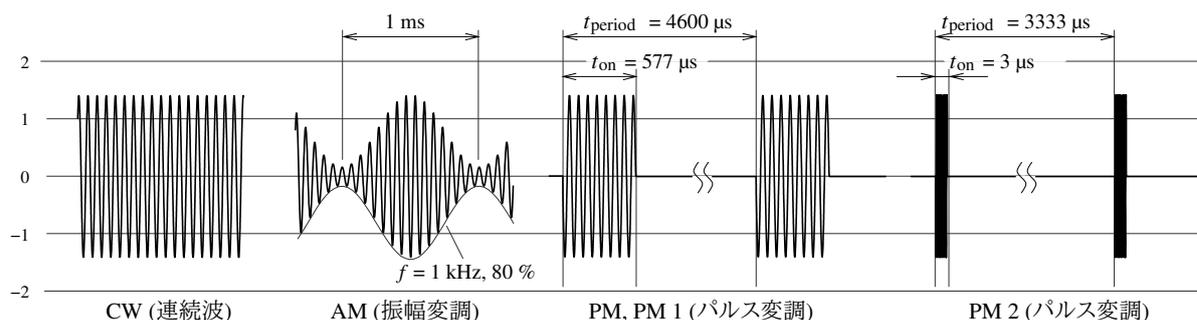


図 11: 変調

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<sup>†10</sup>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 (例えばセンサ入力及時定数 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。

<sup>†10</sup> 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 <sup>†</sup>	10 Hz	10 %
100 Hz~1 kHz <sup>†</sup>	100 Hz	10 %
1 kHz~10 kHz <sup>†</sup>	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 %

<sup>†</sup> 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。<sup>†11</sup>

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。

### 2.10.1 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

<sup>†11</sup> 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。

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 11452-4

### 3.1 参照規格

ISO 11452-4<sup>[1]</sup> 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<sup>[2]</sup> を参照しており、ISO 11452-4 のそれぞれの版での ISO 11452-1 への参照は次のようになっている：

- ISO 11452-4:2005 — ISO 11452-1 (日付なし)
- ISO 11452-4:2011 — ISO 11452-1:2005
- ISO 11452-4:2020 — ISO 11452-1:2015

ISO 11452-4:2005 は ISO 11452-1 を日付なしで参照し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 11452-4:2005 はしばしば ISO 11452-1:2005(+A1:2008) と組み合わせられて用いられている。また、ECE R10.06<sup>[3][4]</sup> は ISO 11452-4:2011 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 11452-4 と ISO 11452-1 の双方の版を明記すると良いだろう。

## 3.2 試験法

ISO 11452-4:2011 と ISO 11452-4:2020 は以下の試験法を、また ISO 11452-4:2005 は BCI 法のみを含む:

- BCI (bulk current injection) 法
  - 置換法 (§3.5)
  - 電力制限付き閉ループ法 (§3.6)
- TWC (tubular wave coupler) 法 (§3.7)

### 3.2.1 背景

ハーネスが接続された装置が無線周波電磁界の妨害に曝された時、装置自身とそのハーネスの双方への妨害の結合が生じる。

高い周波数のこのような無線周波妨害の影響の評価には、ある意味でこの状況を素直に模擬する、アンテナから放射された電磁界に DUT とハーネスを曝す ISO 11452-2<sup>[9]</sup> (ALSE) のような試験法がしばしば用いられている。

だが、低い周波数の無線周波妨害については、ISO 11452-2 のような試験法では妨害の周波数が低くなるのに応じてイミュニティ試験で必要となる高レベルの電磁界の発生が難しくなること、限られた試験距離で遠方の放射源からの電磁波を模擬する

ことが難しくなる<sup>†12</sup>こと、限られた長さのテスト・ハーネスでは妨害のハーネスへの結合が生じにくくなることなどから、周波数が低くなるのに応じて試験を適切に実施することが難しくなる傾向がある。

一方、妨害の周波数が低くなり、その波長 (100 MHz では波長  $\lambda$  は 3 m、400 MHz では 0.75 m) が DUT の大きさに対して大きくなると、それに応じて妨害の DUT への直接的な結合は生じにくくなり、ハーネスへの結合の影響が支配的となる傾向がある。

このため、この規格では 100 kHz~400 MHz (ISO 11452-2:2011 までは 1~400 MHz) をカバーする比較的低い周波数範囲に対する試験法として電流注入プローブを用いて DUT のハーネスに妨害電流を注入する BCI 法が採用されており、これはその周波数範囲の試験法として広く用いられている。

伝統的にはこの規格では 400 MHz までの周波数範囲がカバーされるが、ISO 11452-4:2011 で BCI 法に加えて 400 MHz~3 GHz をカバーする TWC 法が導入され周波数範囲が 3 GHz までに拡大された。

このような高い周波数では一般には無線周波電磁界の妨害の DUT への直接的な結合の影響を無視できるとは言い難く、従ってこの試験法の有効性は限定的なものとなりそうである。また、正式な適合試験で TWC 法の使用が認められるケースはあまり多くないかも知れない。しかし、このような高い周波数でもハーネスを介した影響が支配的となりそうなく小型の、良くシールドされたデバイスの予備評価や量産品の検査などの目的では特に、TWC 法は魅力的な評価方法となるかも知れない。

### 3.2.2 BCI 法の原理

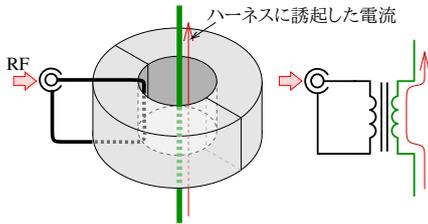
BCI (bulk current injection)<sup>†13</sup> 法では試験対象のハーネスに取り付けた電流注入プローブ (BCI プローブ) によってハーネスにコモン・モード電流を誘起させることで試験が行なわれる。

電流注入プローブはトロイド状のコアに巻線を施したもので、その巻線を一次巻線、トロイドの穴の中に通されたハーネスを単巻の二次巻線としたトラ

<sup>†12</sup> 遠方界条件とするためにアンテナからの距離を  $\lambda/2\pi$  以上としようとした場合、例えば 1 MHz では  $\lambda$  は 300 m で、 $\lambda/2\pi$  は 50 m 弱となる。

<sup>†13</sup> bulk current はハーネス内のコモン・モード電流の総量

ンスとして機能し、電磁誘導によってハーネスに電流を誘起させる (図 12)。



シールドは図示していない  
図 12: 電流注入プローブの原理

電流注入プローブは方向性を持たず、対向器 (ロード・シミュレータ) も DUT と同様に強い妨害に曝されるため、対向器はそれに耐えるものであることが必要となる。

また、BCI 法で DUT に注入される妨害のレベルは対向器やハーネスに対して極めて敏感であり、DUT に適切に妨害を注入するためにはそれらにも注意を払うことが必要となるだろう。

ハーネスが電氣的に短い低い周波数範囲については、ハーネスに誘起して DUT に注入される電流は、対向器からハーネスを通して DUT に注入され、グランド・プレーンを通して対向器に戻るものと見ることができる (図 13)。

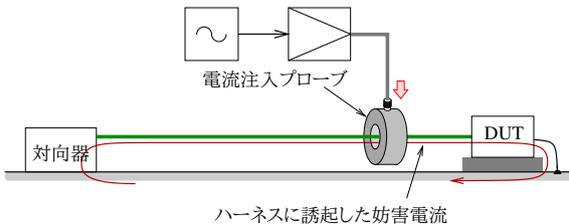


図 13: BCI 試験の原理

従って、低い周波数 (電流注入プローブと対向器のあいだのハーネスが電氣的に短くなるような周波数) の妨害電流をハーネスに適切に誘起させるためには対向器のグランド・プレーンに対するインピーダンスが低いことが非常に重要となる。そのインピーダンスが高い場合、ハーネスには著しく低い妨害電流しか誘起されず (従って DUT には著しく低い妨害しか注入されず)、適切に妨害を印加していれば不合格となった筈のものを合格と判断する結果となる可能性もある。

DUT 側のインピーダンスが高い場合はいずれにしても DUT に注入される電流のレベルは低くな

るが、この場合も DUT に適切に妨害を印加するためには対向器側のインピーダンスは DUT 側のインピーダンスよりも十分に低いべきである。

ハーネスが電氣的に長くなる高い周波数範囲での挙動はそれほど単純ではないが、対向器のインピーダンスが低い (例えば高周波的に接地されている) 場合も高い (例えばフローティングとなっている) 場合も電流注入プローブから対向器側を見た時のインピーダンスは周波数によって大きく変動することが予期され、そのインピーダンスが高くなる周波数では DUT 側に注入される妨害のレベルも低くなる。

例えば、対向器でハーネスが高周波的に接地されている場合、電流注入プローブと対向器のあいだのハーネスの長さが波長の  $1/4$  となる周波数 (誘電体による波長短縮効果などを無視すれば、テスト・ハーネス長 1700 mm、電流注入プローブの位置 150 mm の場合は 1550 mm で、50 MHz 弱) では電流注入プローブから対向器側を見るとハーネスがその位置で開放となっているように見え、従って妨害電流を流すことができず、DUT 側にも妨害は注入されなくなる (§4.2、例えば 図 31 など参照)。

だが、この影響は規格で要求されている、あるいは示唆されているように電流注入プローブの位置を変えて試験を繰り返せばある程度は低減可能である。

この種の問題については §4.2 でもう少し詳しく扱う。

### 3.2.3 TWC 法の原理

TWC 法でも BCI 法と同様に試験対象のハーネスに注入デバイスを取り付けて妨害を注入するが、注入デバイスとして電流注入プローブとは異なる原理に基づく tubular wave coupler (TWC) が用いられる。

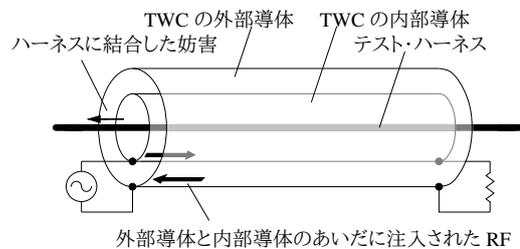


図 14: TWC の原理

TWC は方向性結合器と同様の原理に基づくものと説明されており<sup>[10]</sup>、TWC の内部導体と外部導

体とで構成される 50 Ω の同軸線路に高周波信号が注入され、その内側に通されたテスト・ハーネスと内部導体とで構成される別の同軸線路への妨害波の結合が生じる (図 14)。<sup>†14</sup>

TWC は内部導体と外部導体とで構成される同軸線路を TEM モードのみが伝播するようにすることが想定されている。

このため、TWC の使用はその同軸線路の高次モードのカットオフ周波数<sup>†15</sup>よりも低い周波数に制限され、3 GHz までの使用のためには TWC の内部導体の外径は 18 mm 程度までに、従って内径は 16 mm 程度までに制限される。

Note: 内部導体の外径  $d_1$ 、外部導体の内径  $d_2$  の同軸線路の特性インピーダンス  $Z_0$  は、

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right)$$

で、 $Z_0 = 50 \Omega$  とすると  $d_2 \approx 2.30d_1$  となる。

同軸線路の高次モードのカットオフ周波数  $f_c$  は、

$$f_c = \frac{c}{\pi \frac{d_1 + d_2}{2} \sqrt{\epsilon_r}}$$

で<sup>†16</sup>、 $c = 299\,792\,458$  m/s、 $d_1$  と  $d_2$  の単位を mm、 $f_c$  の単位を GHz とすると、

$$f_c \approx \frac{190.85}{(d_1 + d_2)\sqrt{\epsilon_r}}$$

さらに  $d_2 = 2.30d_1$ 、 $\epsilon_r = 1$  とすると

$$f_c \approx \frac{190.85}{3.30d_1} = \frac{57.8}{d_1}$$

となり、3 GHz に対して 5 % の余裕を見て  $f_c = 3.15$  GHz とすると  $d_1 \approx 57.8/f_c = 18.3$  mm となる。

この太さの制限のため、ある種の ECU のように多数のワイヤが接続されるデバイスや電気自動車のインバータのように太いワイヤが用いられるデバイスへのこの試験法の適用は困難となるかも知れない。だが、いずれにしてもその種のデバイスの多くについては、ハーネスに高い周波数の妨害を注入する方法では外部からの無線周波電磁界の影響をあまり良く模擬できないかも知れず、この試験法の有効性はかなり限定的なものとなりそうに思われる (§3.2.1 も参照)。

この規格で示されている最大の試験レベルは 1 GHz で 29 dBm、3 GHz で 26 dBm であり、

<sup>†14</sup> TWC に注入されたエネルギーの一部は反対側の端から空間に電磁波として直接放射されるだろうが、それは管理されておらず、また一般にはその影響は小さいものと思われる。

<sup>†15</sup> その線路を高次モード (TE や TM) が伝播できるようになる下限の周波数。

<sup>†16</sup> 例えば *Microwave Engineering* (David M. Pozar, 1990) 参照

1 GHz で -6 dB 程度、3 GHz で -12 dB 程度の挿入損失の TWC が市販されている<sup>†17</sup>ので、条件によってはこのレベルの試験を 10 W 程度の高周波電力で行なえる計算となる。

方向性を全く持たない電流注入プローブと異なり、TWC は幾分か方向性を持つ<sup>†18</sup>ことが期待され、その効果はそれほど大きいものではないかも知れないものの、電流注入プローブの場合と比較して幾分かは対向器側の状況が DUT への妨害の注入に影響しにくくなることも、また注入された妨害が対向器に影響を与えにくくなることも期待できそうである。

### 3.3 試験場所

#### 3.3.1 シールド・ルーム

この規格の試験では電磁界を意図的に空間に放射するわけではないものの、妨害の注入に伴って相当の電磁界が放射される。このため、施設外への干渉の防止のため、基本的には試験は適切なシールド・ルームの中で行なうことが必要となる (図 15)。

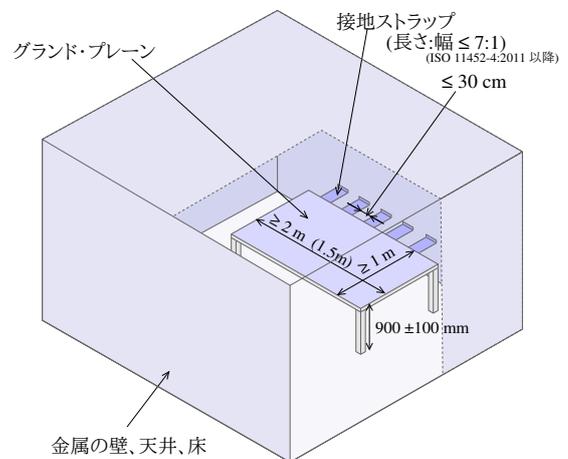


図 15: シールド・ルームの概観

このシールド・ルームは ISO 11452-2<sup>[9]</sup> で用いられるような電波暗室 (ALSE) であっても良い。<sup>†19</sup>

<sup>†17</sup> 但し、これは内径が 10 mm のもので、同じシリーズで内径が 16 mm のものの挿入損失は 1 GHz で -10 dB 程度、3 GHz で -16 dB 程度となっている。

<sup>†18</sup> 例えば [13] では 6 dB 程度の方向性が報告されている。

<sup>†19</sup> 単なるシールド・ルームでは、特に高い周波数範囲で、妨害が注入されたハーネスなどから空間に放射された電磁波がシールド・ルームの壁で繰り返して反射されて広い範囲で高レベルの電磁界を生じ、問題を引き起こす可能性もある。このような問題が懸念される場合、その周波数帯に対応した電波暗室 (ALSE) を用いることが望ましいかも知れない。

### 3.3.2 グランド・プレーン

この試験は非導電性の試験台の上にグランド・プレーンとして厚さ 0.5 mm 以上の銅、黄銅、あるいは亜鉛めっき鋼の板を敷き、その上に試験対象となるシステムを配置して行なう。グランド・プレーンの面の高さは  $900 \pm 100$  mm とする。

このグランド・プレーンは 300 mm 以下の間隔で取り付けられた接地ストラップで、シールド・ルームの壁か床に直流抵抗が  $2.5 \text{ m}\Omega$  以下となるように接続する。少なくとも ISO 11452-4:2011 以降では接地ストラップの長さとの比率は 7:1 以下でなければならない (図 15)。

グランド・プレーンの最小の大きさは、電力制限付き閉ループ法を用いた BCI 法の場合は  $1500 \times 1000$  mm、その他の場合は  $2000 \times 1000$  mm (一部、規格の版による違いがある) で、試験対象システムの大きさに応じてさらに大きい実際に必要な大きさのものを用いる。

一般に、グランド・プレーンは試験対象システム (テスト・ハーネスや周辺装置などを含む) 全体を全周に 100 mm 以上の余裕を持って配置できるような大きさが必要となる。但し、グランド・プレーン上に置かれたロード・シミュレータ (§2.3) の先に他の装置が接続される場合、ロード・シミュレータで適切に減結合されている (RF 境界が作られている) 限りはロード・シミュレータから先の配置やケーブルの引き回しは重要ではなく、そのような装置は顕著な悪影響なしにグランド・プレーンの外に置けると考えられる。

## 3.4 試験対象システムのセットアップ

### 3.4.1 基本的なセットアップ

BCI 法の基本的な試験セットアップの例を図 16 (置換法) と図 17 (電力制限付き閉ループ法) に、また TWC 法の基本的なセットアップの例を図 18 に示す。

いずれの場合も、DUT はグランド・プレーン (§3.3.2) 上の厚さ  $50 \pm 5$  mm の低誘電率 ( $\epsilon_r \leq 1.4$ )<sup>†20</sup> の絶縁台の上に置き、グランド・プレーンの縁から 100 mm 以上離れた位置に配置する。

<sup>†20</sup> 密な材料は誘電率が高いため、発泡材 (例えば発泡ポリスチレン) が用いられる。

DUT の筐体は、それが実際の設置に際して車体に接続される場合は短いワイヤでグランド・プレーンに接続する。

DUT とロード・シミュレータなどとのあいだのテスト・ハーネスは

- ISO 11452-4:2005 の場合、ハーネス長は  $1000 \pm 100$  mm とし、その全長を真っ直ぐに引く;
- ISO 11452-4:2011 以降:
  - 電流制限付き閉ループ法を用いた BCI 法の場合、ハーネス長は  $1000^{+200}_0$  mm とし、その全長を真っ直ぐに引く;
  - その他の場合、ハーネス長は  $1700^{+300}_0$  mm とし、DUT から少なくとも 1400 mm は真っ直ぐに引く。

このハーネスは厚さ  $50 \pm 5$  mm の低誘電率 ( $\epsilon_r \leq 1.4$ ) の絶縁台の上に置き、グランド・プレーンの縁から 200 mm 以上離して、また真っ直ぐに引いた部分はグランド・プレーンの縁と平行に引く。

ハーネスに分岐がある場合は電流注入プローブや TWC をそれぞれの分岐に取り付けても試験すべきであり、この場合、電流注入プローブや TWC に通されていない分岐は電流注入プローブや TWC に通された分岐から 100 mm 以上離して配置する。

分岐の構成の詳細はテスト・プランで示さなければならない。またテスト・レポートに記録しなければならない。

### 3.4.2 HV 電源に接続されるシステムのセットアップ (ISO 11452-4:2020)

ISO 11452-4:2020 ではシールドされた電源システムから給電される装置に対する試験の方法が追加されており、これは電気自動車のインバータや充電システムのように HV (高圧) 電源<sup>†1</sup> (例えば DC 300 ~ 500 V 程度のバッテリーのような) に接続されるシステムの試験に用いることができる。<sup>†21</sup>このようなシステムは充電のために DC や AC の電源にも接続されることもある。

このようなシステムの試験セットアップの例を図 19 と図 21 に示す。

<sup>†21</sup> ECE R10.06<sup>[2][4]</sup> は ISO 11452-4:2011 を参照しているが、これと似た規定を含む。



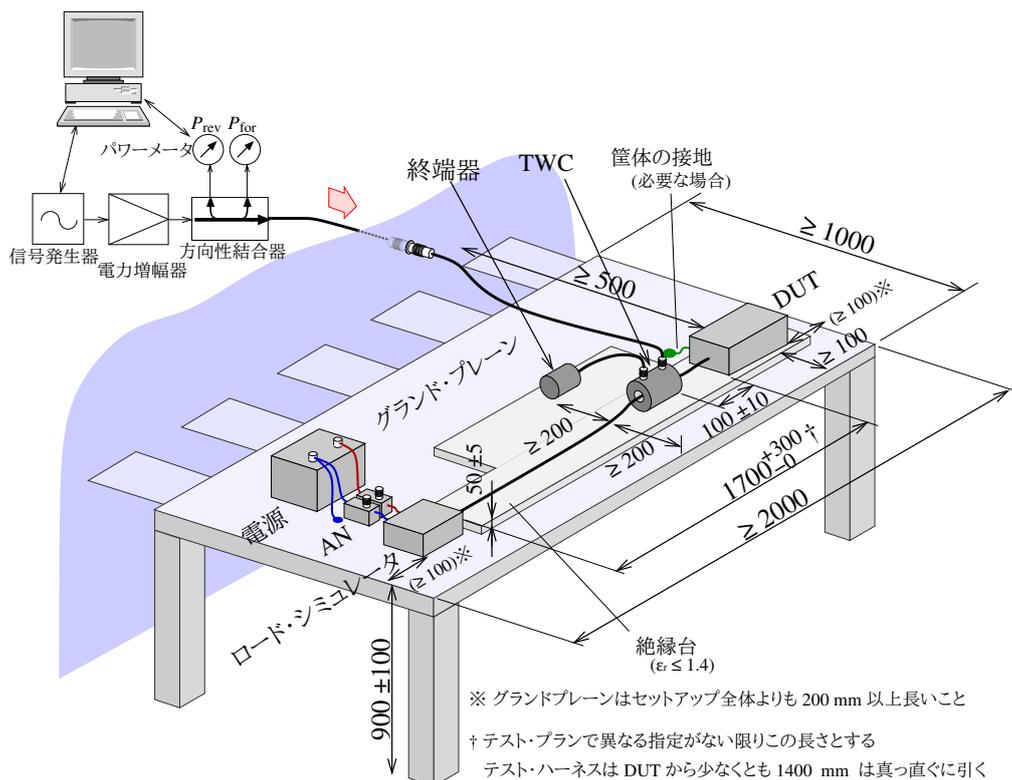


図 18: ISO 11452-4 TWC 法 試験セットアップの例

基本的な事項は §3.4.1 と共通であり、追加や変更となる主な事項は:

- テスト・プランでこれと異なる規定がない限り、DUT はグラウンド・プレーン上に直接置き、直接もしくは規定されたインピーダンスを介してグラウンド・プレーンに接続する。

バッテリー充電器はグラウンド・プレーンに接続する。

- HV 電源ラインは HV-AN (§2.2.2) を介して接続する。

必要な場合、実際の使用状況でのコモン・モードやディファレンシャル・モードのインピーダンスを模擬するためのインピーダンス整合回路網を HV-AN と DUT のあいだに接続することもできる。

- シールドされたハーネスの構造とコネクタ終端は車両での使用を代表するものとし、これはテスト・プランで規定する。

そのシールドはテスト・プランで他の形とするように規定されている場合を除きロード・シミュ

レータなどのケースに 360° 接続する。<sup>†22</sup>

- バッテリー充電器の試験では、

- 充電用の AC 電源ラインはグラウンド・プレーン<sup>†23</sup>上に置かれた AMN (§2.2.3) を介して接続し、充電器の PE (保護接地) 導体はグラウンド・プレーンと AMN の PE 端子に接続する。<sup>†24</sup>

- 充電用の DC 電源ラインは他の HV 電源ラインと同様に HV-AN を介して接続する。<sup>†25†26</sup>

<sup>†22</sup> ケーブル・シールドの接続は測定結果に有意な影響を与える可能性があり、実際の使用での状況を模擬するために意図的に別の形とする場合以外は高周波的に良好な接続を行なうべきである。ケーブルのシールドのシールド・ボックスへの接続は、例えば HV-AN のシールド・ボックスに取り付けられた EMC 用のケーブル・グランド (cable gland) を用いてケーブルのシールドを全周でシールド・ボックスに接続することで行なえる (図 5)。いわゆる「ビッグ・テール」接続は一般に許容できない。

<sup>†23</sup> ISO 11452-2:2019<sup>[9]</sup> と異なり、床のグラウンド・プレーンではない。

<sup>†24</sup> AMN の PE 端子への接続は通常は充電器の電源コードを AMN のアウトレットに挿すだけで行なえる筈である。

<sup>†25</sup> これは充電用の DC 電源ラインに DC-charging-AN を用いるように規定されている CISPR 25:2021<sup>[6]</sup> や ECE R10.06<sup>[3][4]</sup> とは異なる。

<sup>†26</sup> ISO 11452-4:2020 は DC での充電に関する具体的な規定を含まないが、ISO 11452-1:2015 で DC 電源に接続しての充電モードで HV-AN を用いるように規定されている。

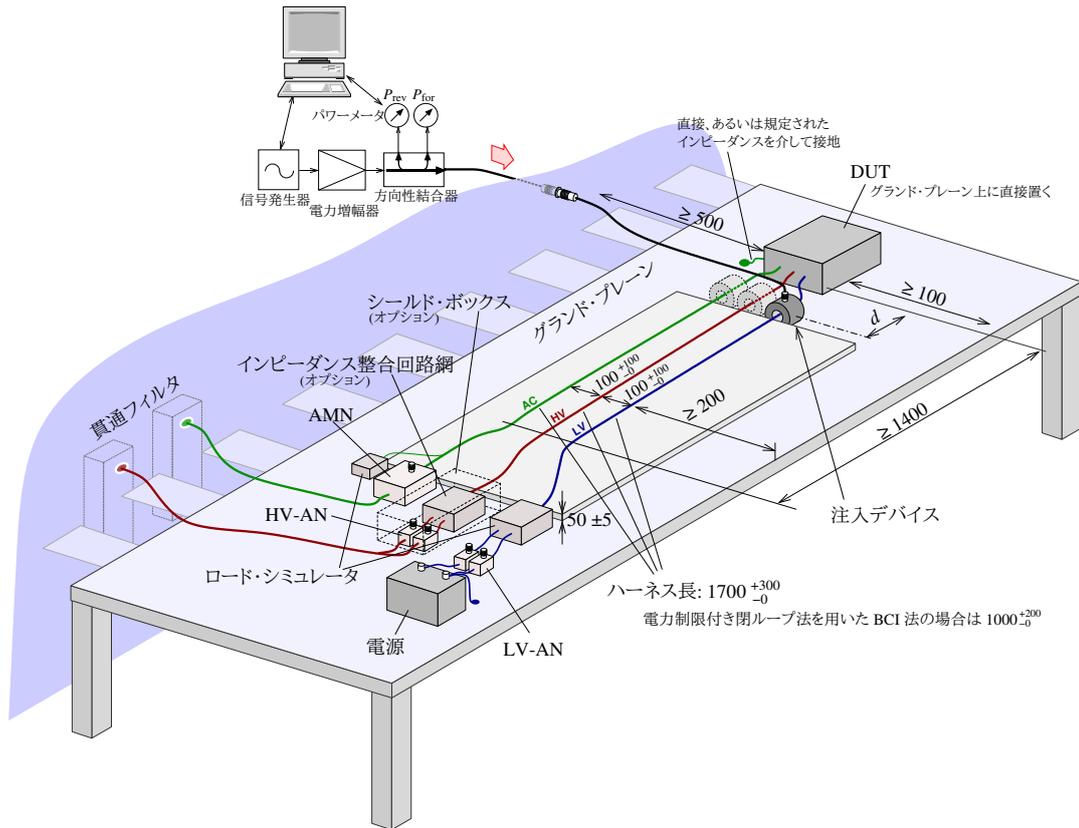


図 19: オンボード AC 充電器の試験セットアップの例 (置換法を用いた BCI 法)

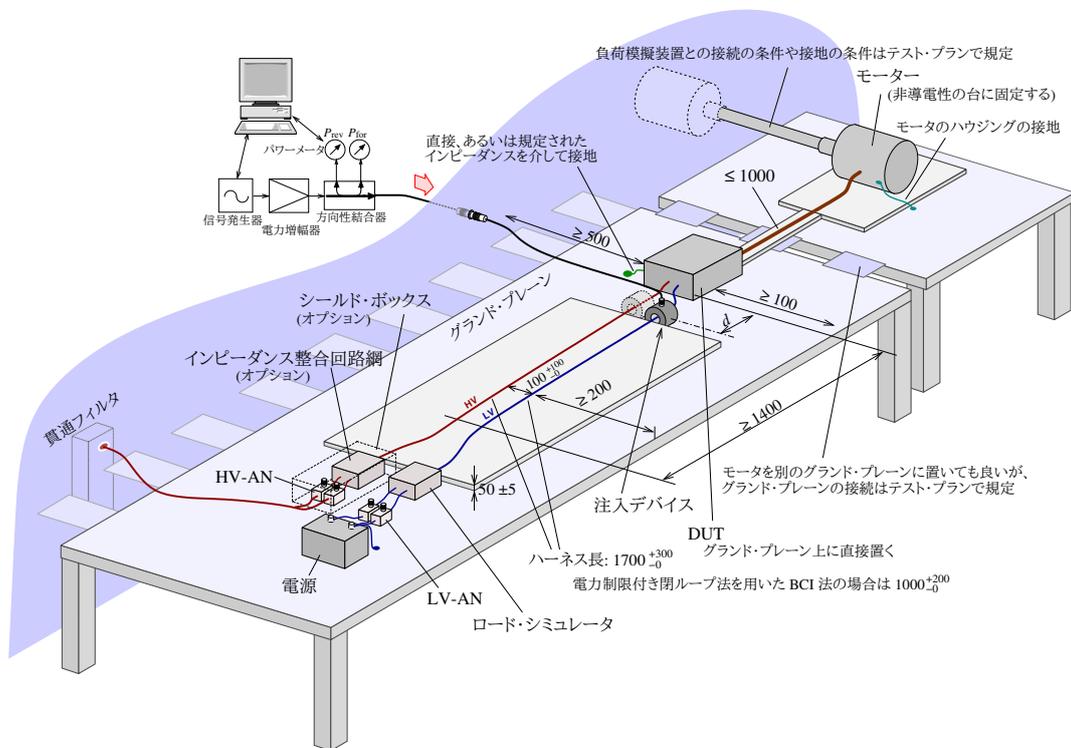


図 20: モータを含むシステムの試験セットアップの例 (置換法を用いた BCI 法)

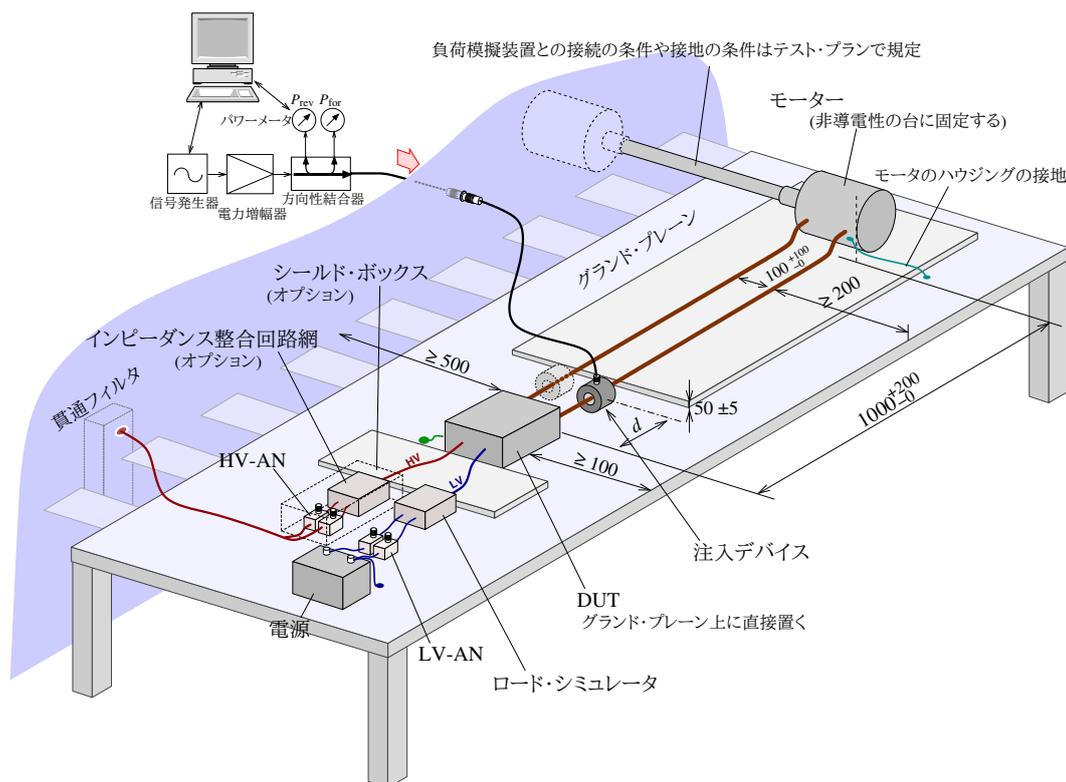


図 21: モータを含むシステムの試験セットアップの例 — モータとのあいだのラインへの印加 (置換法を用いた BCI 法)

- 充電器やインバータの通信線に AAN (§2.2.4) を挿入しても良い。
- AN、HV-AN、AMN の測定ポートは全て 50 Ω の終端器 (AN などに内蔵のもの、あるいは外付けの同軸終端器) で終端する。
- テスト・ハーネスは、
  - 厚さ  $50 \pm 5$  mm の低誘電率 ( $\epsilon_r \leq 1.4$ ) の絶縁台の上に置く。
  - テスト・ハーネスは、
    - \* 電流制限付き閉ループ法を用いた BCI 法の場合、 $1000^{+200}_0$  mm の長さとし、その全長を真っ直ぐに引く；
    - \* その他の場合、 $1700^{+300}_0$  mm の長さとし、DUT から少なくとも 1400 mm は真っ直ぐに引く。<sup>†27</sup>
- HV 系のテスト・ハーネスはグランド・プレーンの縁から 200 mm 以上離して、また真っ直ぐに引いた部分はグランド・プレーンの縁と平行に引く。
- LV 系のテスト・ハーネス (該当する場合) は HV 系のハーネスから、また充電用の電源ライン (該当する場合) はその隣のハーネスからそれぞれ  $100^{+100}_0$  mm の距離に引く。
- モータ (電動機) が含まれる場合、
  - DUT とモータのあいだの動力ケーブル、及び信号ケーブルへの妨害の注入も行なう。
  - DUT とモータのあいだのケーブル長は DUT とモータのあいだのラインへの妨害の注入を行なう場合以外は 1000 mm 以内と、妨害の注入を行なう場合は  $1000^{+200}_0$  mm とする。<sup>†28</sup>

<sup>†27</sup> ISO 11452-4:2020 Figure 4, 5, 7 (BCI 置換法)、12, 13, 15 (TWC 法) は HV ライン、LV ライン、AC ラインの長さ (あるいは装置間の距離) を 1400 mm 以上とし、その全長を真っ直ぐに引くような図となっている。だが、ISO 11452-4:2020 §8.4 では電力制限付き閉ループ法を用いた BCI 法以外では HV ライン、LV ライン、AC ラインの長さを  $1700^{+300}_0$  mm とし、DUT から少なくとも 1400 mm は真っ直ぐに引く (勿論、1700 mm は 1400 mm 以上であるので、本文と図が矛盾しているという

わけでもない) ように規定されており、本文のこの規定に従えば良いと思われる。

<sup>†28</sup> ISO 11452-4:2020 の本文にはモータとのあいだの 3 相ラインを 1000 mm 以内とする旨の記載しか見当たらない。だが、

- モータは別のグラウンド・プレーンに置いて良い<sup>†29</sup>が、テスト・プランでグラウンド・プレーン間の接続の構成を規定しなければならない。
- これと異なる規定がない限りモータは非導電性の取付台上に取り付け、そのハウジングをグラウンド・プレーンに接続する。<sup>†30</sup>
- 負荷機械模擬装置を使用する場合、DUT と負荷機械模擬装置のあいだの接続の条件、また必要な接地の条件をテスト・プランで規定する。

- 試験は、

- テスト・ハーネスの配置を変えずに、LV ライン、HV ライン、充電用の電源ライン (該当する場合) をそれぞれ注入デバイスに通して試験する。
- モータまでのケーブルが 1000 mm 以上<sup>†31</sup> となる場合、HV ラインと LV 信号ラインを同時に注入デバイスに通しても試験する。
- ハーネスに分岐がある場合、注入デバイスをそれぞれの分岐に取り付けても試験すべきである。

分岐の構成の詳細はテスト・プランで示さなければならず、またテスト・レポートに記録しなければならない。

### 3.5 BCI 法 — 置換法

BCI (bulk current injection) 法は電流注入プローブ (BCI プローブ) を用いてテスト・ハーネスに高周波の妨害を注入して装置のイミュニティを評価するもので、100 kHz~400 MHz (ISO 11452-4:2011 まででは 1~400 MHz) に適用可能である。

Figure 6 (BCI 置換法), 10 (BCI 閉ループ法), 14 (TWC 法) では  $1000_{-0}^{+200}$  mm となっており、印加対象のハーネスについて最大長しか規定しないのはやや不自然に思われるので、モータへの動力線とその他の線 (エンコーダなど) について図で示された  $1000_{-0}^{+200}$  mm という値を適用するのが良さそうに思われる。

<sup>†29</sup> 強度や振動などの理由のため、グラウンド・プレーンを分離することが望ましい、あるいは必要となることもあるかも知れない。

<sup>†30</sup> 特に大型のモータでは固定部が相当の力や振動を受けるかも知れず、固定にかなりの注意が必要となるかも知れない。

<sup>†31</sup> モータまでのケーブル長は 1000 mm 以内とするように述べられている。これは実際の使用に際して 1000 mm 以上となるかも知れない場合、と解釈するのが良いだろう。

BCI 法には

- 置換法
- 電力制限付き閉ループ法

の 2 つがあり、置換法についてはこの章で、また電力制限付き閉ループ法については次の章 (§3.6) で述べる。

置換法は、電流注入プローブを校正治具に取り付けた状態で各周波数で所定の電流を発生させるために電流注入プローブに印加する必要がある進行波電力を求めておき、試験時には所定の電流を発生させるために必要な進行波電力を電流注入プローブに印加するもので、

- 校正治具上での校正 (§3.5.1)
- DUT の試験 (§3.5.2)

の 2 つの段階を含む。

#### 3.5.1 校正

以下のような方法で、各周波数で所定の電流<sup>†32</sup>を発生させるために電流注入プローブに印加する必要がある進行波電力を求める (図 22):

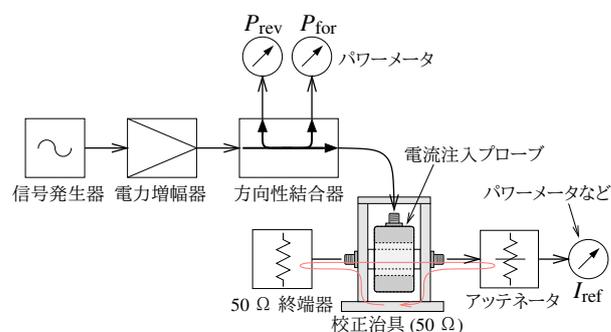


図 22: BCI 法 — 校正

1. 電流注入プローブを 50  $\Omega$  の校正治具に取り付ける。

校正治具の一方のポートは適切な定格の 50  $\Omega$  同軸終端器で終端し、もう一方のポートは必要に応じて適切な定格の 50  $\Omega$  同軸減衰器を介して基準となる測定器、例えばスペクトラム・ア

<sup>†32</sup> おそらくその試験系を用いる最大の試験レベル。他のレベルでの試験の場合は §3.5.2 で触れるようにその校正の結果からの換算を行なうことができる。

ナライザや終端型パワーメータなど<sup>†33</sup>に接続する。

電流注入プローブには電力増幅器の出力を方向性結合器を介して接続し、方向性結合器の結合ポートには進行波電力と反射波電力の測定のためのパワーメータなどの測定器を接続する(図 22)。

2. ISO 11452-1 で規定された最大周波数ステップ(表 3)よりも大きくない周波数ステップのそれぞれの周波数で、校正治具に接続した測定器で測定された電流が所定の値となるように信号発生器の出力を調整し、その時の進行波電力と反射波電力<sup>†34</sup>を記録する。

この校正は無変調で行なう。

3. 必要な場合、電力増幅器の出力の信号の品質が要求 (§2.6) を満たすこと、また試験系のリニアリティ<sup>†38</sup>が維持されていることの確認も校正手続きの一部として実施できるだろう。<sup>†35</sup>

### 3.5.2 試験

試験は、電流注入プローブをテスト・ハーネス全体の、またハーネスに分岐がある場合はそれぞれの分岐の所定の位置に取り付け、所定の妨害電流を発生させるために必要な進行波電力を電流注入プローブに印加することで行なう。

1. 電流注入プローブを試験対象のテスト・ハーネスやハーネスの分岐の以下の位置に取り付ける(図 16):

- ISO 11452-4:2005 — DUT のコネクタから 150±10 mm、450±10 mm、及び 750±10 mm;

<sup>†33</sup> ISO 11452-4 ではスペクトラム・アナライザがそれと同等のものとして記載されているが、周波数分析は不要であるのでパワーメータのようなものを用いることもできそうに、また一般にその方が校正の不確かさを小さく抑えられそうに思われる。

<sup>†34</sup> 反射波電力は制御などには使用されないが、それを記録することが、また要求があればテスト・レポートに記載することが定められている。また、方向性結合器から先に異常(例えば同軸ケーブルや電流注入プローブの断線、コネクタの接触不良のような)があれば反射波電力が大きくなることが予想されるので、校正と試験に際して反射波電力にも注意を払うことは有用であろう。

<sup>†35</sup> あるいは、要求が維持される出力の範囲(少なくとも最大出力)を別途確認しておき、試験で必要となる出力がその範囲を超えないことを確認することもできるかも知れない。

- ISO 11452-4:2011 以降 — DUT のコネクタから 150±50 mm;  
これに加えて、DUT のコネクタから 450±50 mm、及び 750±50 mm での試験も必要かも知れない。<sup>†36</sup>

また、DUT のコネクタから 50±10 mm の位置に電流測定プローブを取り付けても良い。<sup>†37</sup>

これらのプローブの位置はプローブの中央までの距離である。

2. 指定された周波数ステップ (§2.9) のそれぞれの周波数で、電流注入プローブに注入される進行波電力が指定された試験レベルを発生させるために必要な値となるように信号発生器の出力を調整し、指定された変調 (§2.7) の妨害電流を指定されたドウェル・タイム (§2.8) のあいだ出力させ、DUT への影響を確認する。

電流  $I_{\text{test}}$  の発生のために必要な進行波電力  $P_{\text{test}}$  は校正 (§3.5.1) で得られた進行波電力  $P_{\text{cal}}$  とその時の電流  $I_{\text{cal}}$  とから、

$$P_{\text{test}} = P_{\text{cal}} \left( \frac{I_{\text{test}}}{I_{\text{cal}}} \right)^2$$

として算出できる。<sup>†38</sup>

また、少なくとも ISO 11452-4:2011 以降では、校正の際よりも細かい周波数ステップで試験を行なう場合、補間に伴う誤差が 0.5 dB を超えないならば校正された周波数のあいだの補間を行なうことができる。

<sup>†36</sup> §4.2 で説明しているように、電流注入プローブの位置 1 箇所だけで試験を行なった場合は DUT にあまり妨害が注入されない(試験が有意に甘くなる)周波数帯が生じることが予想され、それが不要だと考える根拠がある場合以外は電流注入プローブの位置を変えて試験を繰り返すことが望ましいように思われる。

<sup>†37</sup> §4.2 で述べるように DUT 以外の要因によって DUT に印加される妨害のレベルが著しく低くなる場合があるが、電流測定プローブで電流の監視を行なうことはそのような状況の検知の役にも立つだろう。但し、DUT に妨害が適切に印加されていても DUT のインピーダンスが高いために電流があまり流れない場合もあるので、電流測定プローブで観測された電流が低いことが DUT に印加されている妨害のレベルが低いことを意味するとは限らない。また、インピーダンスが低いライン(例えばグラウンド線)が含まれているため、他のライン(例えば信号線)のインピーダンスが高いためにそれらのラインには妨害が意図されたように注入されていなくても電流が流れるような場合もあるので、電流測定プローブで観測された電流レベルが高いことが DUT に適切に妨害を印加できていることを示すとも限らない。

<sup>†38</sup> この電力の換算は試験系のリニアリティが維持されていることを前提としている。この規格ではリニアリティの確認に関する要求はないものの、校正 (§3.5.1) の際にリニアリティを確認するのは良い考えと思われる。この換算については ISO 11452-1:2015 §7.2.2.2 で述べられている。

試験では発生させる妨害に変調 (§2.7) を掛けることが多いが、進行波電力  $P_{\text{test}}$  は無変調での値として定義されているため、

- 出力レベルの調整を無変調で行なった後、ピークのレベルを変えないように変調を掛ける
- アベレージ・パワー・センサを用いている場合、変調波形から求めた換算係数を用いて電力の換算を行ない、変調を掛けたままで出力レベルの調整を行なう (ISO 11452-1:2015 §C.4.2 参照)
- 所定の変調を掛けた時も無変調の時と同じ値を得られる PEP (peak envelope power) パワー・センサを用い、変調を掛けたままで出力レベルの調整を行なう

のいずれかの対応が必要となりそうである。

### 3.6 BCI 法 — 電力制限付き閉ループ法

電力制限付き閉ループ法を用いた BCI 法では試験時に注入される妨害のレベルはテスト・ハーネスに取り付けられた電流測定プローブで測定された電流が試験レベルに達するように調整される。

だが、電力の制限レベルの決定のために校正治具上で所定のレベルの電流を発生するために必要となる進行波電力の情報が必要となることから置換法 (§3.5) の場合と同様の校正治具上での校正も必要で、

- 校正治具上での校正 (§3.6.1)
- DUT の試験 (§3.6.2)
- テスト・ベンチのトランスファ・インピーダンスの同定 (§3.6.3)

の作業が必要となる。

#### 3.6.1 校正

校正は置換法の場合 (§3.5.1) と同様で、おそらく同じ校正結果を置換法と電力制限付き閉ループ法の双方に使用することもできるであろう。

但し、電力制限付き閉ループ法での試験の際に電流注入プローブに印加される進行波電力は、校正治具上での校正の結果から求められた試験レベルの電

流を発生させるために必要な進行波電力の  $k$  倍 (通常は  $k = 4$ ) までに制限される。すなわち、同じ試験レベルに対して、電力制限付き閉ループ法での試験では置換法の場合の  $k$  倍 (通常は  $k = 4$ ) の進行波電力が必要となることがある。

従って、この校正そのものは試験レベルの  $\sqrt{k}$  倍 (通常は 2 倍) ではなく試験レベルで行なうこともできるかも知れないとしても、試験系は試験レベルの発生のために必要な進行波電力の  $k$  倍 (通常は  $k = 4$ ) までの進行波電力で信号の品質 (§2.6) やリニアリティを維持することが必要となる。

#### 3.6.2 試験

試験は、電流注入プローブと電流測定プローブをテスト・ハーネス全体の、またハーネスに分岐がある場合はそれぞれの分岐の所定の位置に取り付け、電流測定プローブで測定された電流を試験レベルに合わせるように電流注入プローブに印加する電力を調整することで行なう。

1. 試験対象のテスト・ハーネスやハーネスの分岐の DUT のコネクタから  $900 \pm 10$  mm の位置に電流注入プローブを、DUT のコネクタから  $50 \pm 10$  mm の位置に電流測定プローブを取り付ける (図 17)。

これらのプローブの位置はプローブの中央までの距離である。

2. 指定された周波数ステップ (§2.9) のそれぞれの周波数で、

- 電流測定プローブで測定された電流が試験レベルに達する;
- あるいは、電流注入プローブに印加する進行波電力が制限レベルに達する

まで信号発生器の出力を増加させ、指定された変調 (§2.7) の妨害電流を指定されたドウェル・タイム (§2.8) のあいだ出力させ、DUT への影響を確認する。

試験レベル  $I_{\text{test}}$  での試験の場合の進行波電力の制限レベル  $P_{\text{CW1}}$  は、校正 (§3.5.1) で得られた進行波電力  $P_{\text{cal}}$  とその時の電流  $I_{\text{cal}}$ 、及びあらかじめ決められた係数  $k$  (通常は  $k = 4$ ) から、

$$P_{\text{CW1}} = k P_{\text{cal}} \left( \frac{I_{\text{test}}}{I_{\text{cal}}} \right)^2$$

として算出できる。<sup>†39</sup>

3. 到達した電流レベル ( $I_{\text{ref}}$ )、及び印加された進行波電力 ( $P_{\text{ref}}$ ) を記録する。

また、DUT の感受性の閾値が見つかったならばその電流 ( $I_{\text{fault}}$ ) とその時に印加された進行波電力 ( $P_{\text{fault}}$ ) も記録する。

校正された周波数のあいだの補間、及び変調への対処については §3.5.2 を参照。

### 3.6.3 トランスファ・インピーダンスの算出

電力制限付き閉ループ法での試験ではテスト・ベンチのトランスファ・インピーダンスの報告も要求されており、その求め方が ISO 11452-4 の Annex B で示されている。

ここで言うトランスファ・インピーダンス  $Z_{\text{tr}}$  は電流注入プローブによってハーネスに誘起されたコモン・モード電圧  $V_{\text{ind}}$  のハーネス上の測定箇所における電流  $I_{\text{ind}}$  に対する比、すなわち

$$Z_{\text{tr}} = \frac{V_{\text{ind}}}{I_{\text{ind}}}$$

として定義される。

トランスファ・インピーダンスの求め方としては、

- ネットワーク・アナライザを用いた測定
- 校正時と試験時に記録されたデータからの計算

の2つが示されており、後者は校正 (§3.5.1) で得られた進行波電力  $P_{\text{cal}}$  とその時の電流  $I_{\text{cal}}$ 、試験時 (§3.6.2) に電流注入プローブに印加された進行波電力  $P_{\text{dir}}$  とその時に電流測定プローブで測定された電流  $I_{\text{ind}}$  とから、

$$Z_{\text{tr}} = 100 \frac{I_{\text{cal}}}{I_{\text{ind}}} \sqrt{\frac{P_{\text{dir}}}{P_{\text{cal}}}}$$

としてトランスファ・インピーダンス  $Z_{\text{tr}}$  ( $\Omega$ ) を求めるものとなる。<sup>†40</sup>

<sup>†39</sup> ここで用いているシンボルは ISO 11452-4 のものとは異なる。また、ここでは試験レベルが校正の際の電流と異なる場合の換算も含めて示している。試験レベルに対する電力の換算については <sup>†38</sup> も参照。

<sup>†40</sup> これに関する ISO 11452-4 での記載には問題が見受けられる。ISO 11452-4:2020 では  $P_{\text{cal}}$  などがいずれも dB (電力は dBm、電流は dBmA) となっているが、勿論、この式で用いるべき値は dB で表現したものではない。(規格ではこの次にこの式を dB で表現に書き換えたものが示されており、その式の場合は dB で表現された値を用いることになるが。) また、ISO 11452-4:2005 や ISO 11452-4:2011 では  $P_{\text{dir}}$  ( $P_{\text{direct}}$ ) が校正治具に印加された電力となっている。

## 3.7 TWC 法

TWC 法では、TWC の挿入損失を校正治具上で求めておき、試験時には試験レベルとその挿入損失とから求めた所定の妨害を発生させるために必要となる進行波電力を TWC に注入する方法が用いられ、

- 校正治具上での校正 (§3.7.1)
- DUT の試験 (§3.7.2)

の2つの段階を含む。

### 3.7.1 校正

特性インピーダンス  $150 \Omega$  の校正治具上で、ISO 11452-1 で規定された最大周波数ステップ (表 3) よりも大きくない周波数ステップで TWC の挿入損失を測定する。この測定はネットワーク・アナライザを用いて任意の信号レベルで行なうことができる (図 23)。

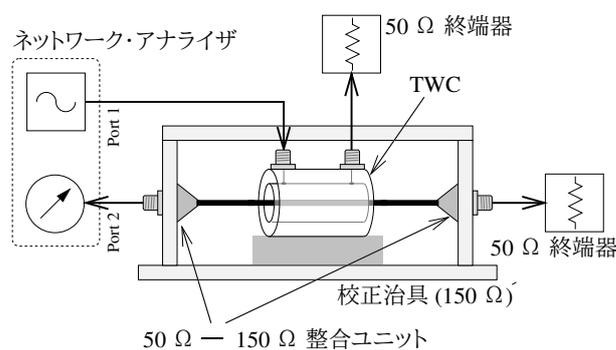


図 23: TWC の校正

この校正治具は  $50 \Omega$  の測定系とのあいだの広帯域整合回路網を含まなければならず、校正治具の製造業者は整合回路網の補正係数を  $1.5 \text{ dB}$  以下の不確かさで与えなければならない。

TWC の補正係数  $I_L$  (dB) は、測定された  $S_{21}$  の大きさ  $|S_{21}|$  (dB)<sup>†41</sup> と校正治具の補正係数  $F$  (dB) とから、

<sup>†41</sup> ここでの  $|S_{21}|$  (ISO 11452-4:2020 での表現のまま) は複素数である  $S_{21}$  の大きさを dB に変換したものを示すもので、dB で表現された  $S_{21}$  の絶対値を取ることを示しているわけではない。

$$I_L = -|S_{21}| - F$$

として算出できる。

校正を試験で使用する試験系 (電力増幅器など) を用いて行なう必要はないが、その試験系の出力信号の品質が試験で必要となる出力の範囲で要求 (§2.6) を満たすことの確認は別途必要となるだろう。

### 3.7.2 試験

試験は、TWC をテスト・ハーネス全体の、またハーネスに分岐がある場合はそれぞれの分岐の所定の位置に取り付け、所定の妨害を発生させるために必要な進行波電力を TWC に印加することで行なう。

1. TWC を試験対象のテスト・ハーネスやハーネスの分岐の DUT のコネクタから  $100 \pm 10$  mm の位置に、グランド・プレーンから絶縁して取り付ける (図 18)。

この距離は TWC の DUT 側の面までの距離であり、プローブの中央までの距離となっている電流注入プローブや電流測定プローブの場合とは異なる。

TWC の DUT 側のコネクタは信号源に接続し、反対側のコネクタはテスト・ハーネスから 200 mm 以上離れた位置にグランド・プレーンから絶縁して置かれた  $50 \Omega$  終端器に接続する。

2. 指定された周波数ステップ (§2.9) のそれぞれの周波数で、TWC に注入される進行波電力が指定された試験レベルを発生させるために必要な値となるように信号発生器の出力を調整し、指定された変調 (§2.7) の妨害波を指定されたドウェル・タイム (§2.8) のあいだ出力させ、DUT への影響を確認する。

試験レベルは電力で規定され、試験レベル  $P_t$  (dBm) の発生のために TWC に印加すべき進行波電力  $P_{fr}$  (dBm) は、校正 (§3.7.1) で得られた TWC の挿入損失  $I_L$  (dB) を用いて、

$$P_{fr} = P_t + I_L$$

として算出できる。<sup>†42</sup>

校正された周波数のあいだの補間、及び変調への対処については §3.5.2 を参照。

## 3.8 テスト・プラン

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。

これには少なくとも以下の事項を含めることが必要となるだろう:

- 試験セットアップ (使用する DUT、ロード・シミュレータ、その他の周辺装置の一覧とその配置などを含む)
- 試験方法
- 周波数範囲
- DUT の動作モード
- DUT の合格基準
- 試験周波数範囲、またそれぞれの周波数範囲に対する以下のものを含む試験条件:
  - 試験厳しきレベル (BCI 法の場合は電流、TWC 法の場合は電力)
  - 変調 (§2.7)
  - ドウェル・タイム (それぞれの周波数の妨害を印加する時間; §2.8)
  - 周波数掃引ステップ (§2.9)
- DUT の監視の条件
- 電流注入プローブと測定プローブの位置
- 複数のコネクタや分岐がある配線の場合の注入の条件
- テスト・レポートの内容
- ロード・シミュレータの詳細
- モータと DUT のあいだのラインの試験のための構成の詳細

<sup>†42</sup> 方向性結合器の結合ポートで観測される電力とのあいだの換算のためには、方向性結合器の結合度、方向性結合器の挿入損失、また方向性結合器と TWC のあいだで生じる損失の補正が必要となる。

- 特別な指示や標準的な試験からの変更
- 通信ラインの、また AAN (使用する場合) の構成の詳細

DUT は交通の安全とユーザビリティの重要性に応じて最も重要な動作モードで、少なくともスタンバイ・モードと全てのアクチュエータが動作できるモードで試験しなければならない。

合格基準は、FPSC (§2.10) の枠組みに従い、それぞれの機能に対する Class A~E、あるいは 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 Class A~E、あるいは 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。

## 4 補足

### 4.1 試験レベルの例

試験レベルの例を 図 24 に示す。

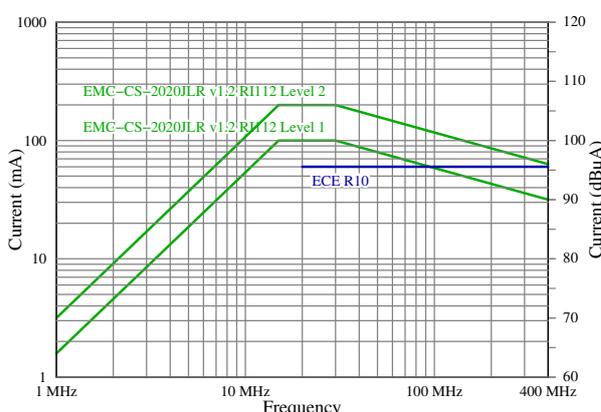


図 24: 試験レベルの例 (ECE R10.06<sup>[3][4]</sup> と Jaguar Land Rover EMC-CS-2010JLR v1.2<sup>[8]</sup>)

### 4.2 BCI 法での妨害レベルの変動

この試験法で DUT に印加される妨害のレベルは様々な要因で大きく変動する可能性がある。これは試験の再現性に影響するのみでなく、意図されたものよりも著しく低いレベルの妨害しか DUT に印加されず、適切に妨害を印加できていれば不合格となった筈のものを合格と判断する結果を招くかも知れない。

この規格では規定されたレベルの妨害を実際に DUT に印加できていることが求められているわけではないため、規格に従って試験を行なっている限りは規格上はこの合格の判断が誤っているとは言えないかも知れないものの、これは実際の使用に際してイミュニティの不足によって生じるかも知れない重大な問題の見落としを引き起こすものとなるかも知れない。<sup>†43</sup>

これは好ましくない、また試験の目的を大きく損なうものとなるかも知れず、そのような問題を防ぐためには適切な配慮が必要となるだろう。

以下ではそのような変動要因のいくつかについて説明する。<sup>†44</sup>

#### 4.2.1 電流注入プローブの位置の影響 (置換法)

ロード・シミュレータ側を短絡状態とした 1000 mm のハーネス (単一のワイヤ) に BCI 法 (置換法) で妨害を注入した時に 50 Ω で終端された DUT 側で観測された妨害レベル (試験レベル、すなわち校正器具上で得られるレベルに対する相対値) を 図 25 に示す。

電流注入プローブは、DUT 側から 150 mm、450 mm、及び 750 mm の位置に置いた。

図 25 の電流注入プローブを 150 mm の位置に置いた時のカーブを見ると 75 MHz 付近に 0.01 (試験レベルの -40 dB、例えば試験レベルが 100 mA であれば 1 mA 前後) に達する妨害レベルの著しい低下が見られ、またその 3 倍と 5 倍の周波数にも相当の低下が見られるが、これは電流注入プローブとロード・シミュレータ側の短絡端とのあいだのハーネスの電気的長さ<sup>†45</sup>が  $\lambda/4$  (そして  $3/4 \lambda$ 、 $5/4 \lambda$ ) となって高インピーダンスを生じ、妨害の注入を妨げているところである。

電流注入プローブの位置を変えれば電流注入プローブとロード・シミュレータのあいだのハーネス

<sup>†43</sup> そして、その機器を搭載した車両が市場に出た後で問題が顕になった場合、ユーザーの不満を、場合によっては安全上のリスクの増大を招くことになるかも知れず、リコールやサービス・キャンペーンのような対応も必要となるかも知れない。また、その問題がその機器が実際に車両に搭載されて市場に出る前、例えば車両に搭載しての評価に際して検出された場合であっても、その対応のためのコスト (そしておそらくは車両の出荷の遅れに伴う損失) は非常に大きなものとなるかも知れない。

<sup>†44</sup> 以下で示すグラフには実測したものと単純なモデルを用いたシミュレーションで推定したものが含まれ、後者には実測データに合わせるように電気的長さを補正したものとそれを行っていないものが混在している。

<sup>†45</sup> 自由空間では  $\lambda/4 = 850 \text{ mm}$  となる周波数は 90 MHz 弱となるが、誘電体の影響で波長は幾分短縮されるだろう。

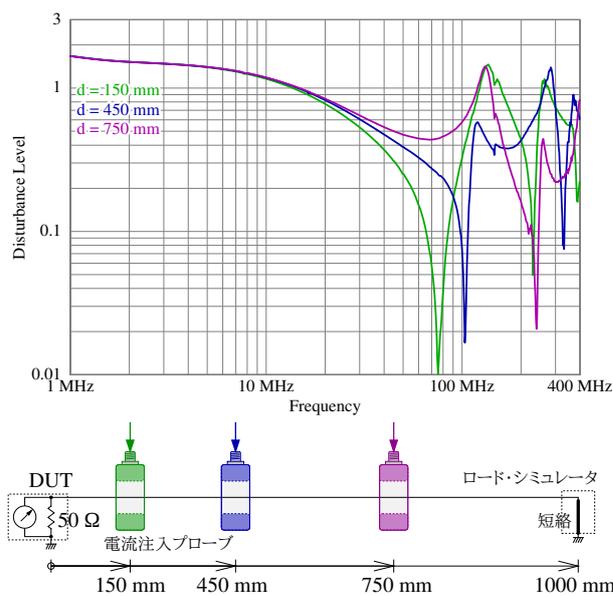


図 25: 電流注入プローブの位置の影響 (実測)

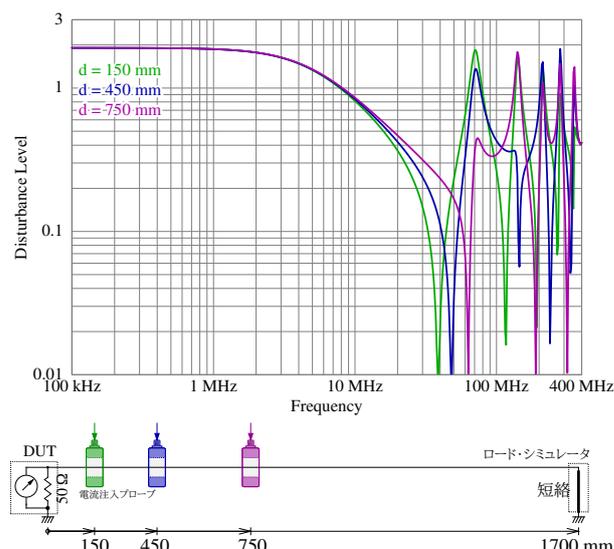
の長さが変化し、それに伴って妨害が極度に入りにくくなる周波数も変化する。例えば図 25 で電流注入プローブを 750 mm の位置に置いた時にはこの周波数はかなり高くなり、電流注入プローブを 150 mm の位置に置いた時に極度の低下が見られた 75 MHz 付近では 0.4 強 (試験レベルの  $-7$  dB 程度、例えば試験レベルが 100 mA であれば 40 mA 強) の妨害レベルを得られている。このため、電流注入プローブをいずれの位置に置いた時も妨害レベルが著しく低くなる周波数は生じているものの、電流注入プローブの位置 3 箇所を試験した時の最大値を見れば、意図されたレベルはかなり下回るかも知れないとしても全周波数範囲である程度のレベルの妨害を注入できている。

このように、電流注入プローブの位置を変えて試験を繰り返すことはこの現象の試験結果への悪影響を低減するために非常に有用である。

ISO 11452-4:2011 以降の置換法を用いた BCI 法ではテスト・ハーネスの長さが以前の  $1000 \pm 100$  mm から  $1700^{+300}_{-0}$  mm に変更されており、電流注入プローブの位置を 150 mm、450 mm、750 mm と変えた時の電流注入プローブとロード・シミュレータとのあいだのハーネスの長さの変化が小さくなることから、その効果はかなり小さくなっている (図 26)。

また、電流注入プローブの位置を 450 mm や 750 mm としての試験はオプションのような扱いに変更されている。<sup>†48</sup>

しかしながら、それでも電流注入プローブの位置

図 26: 電流注入プローブの位置の影響 — ハーネス長  $L=1700$  mm (シミュレーション)

を 450 mm や 750 mm としての試験も行なえば、少なくともここで述べた要因に伴って DUT に注入される妨害のレベルが意図したレベルよりも低くなる程度を相当緩和できる可能性は、例えば 0.1 ( $-20$  dB) を下回るような極度の低下を防げる可能性は高そうである。

従って、適用する規格でそれが要求されていない場合であっても、それが不要だと考える理由がある場合以外は電流注入プローブの位置を変えて (また、場合によっては規格で示されていない位置も追加して) 試験を繰り返すことは良い考えであるように思われる。

#### 4.2.2 ロード・シミュレータのインピーダンスの影響 (置換法)

1000 mm のハーネス (単一のワイヤ) のロード・シミュレータ側の条件を変えて BCI 法 (置換法) で妨害を注入した時に  $50 \Omega$  で終端された DUT 側で観測された妨害レベルを図 27 に示す。

ここで妨害レベルとして示したものは、電流注入プローブの位置を 150 mm、450 mm、750 mm とした時の最大値の試験レベルに対する相対値である。

テスト・ハーネスのロード・シミュレータ側を開放とした時には低い周波数での妨害レベルが極度に低くなっているが、これは低い周波数の妨害を DUT に注入するためには妨害電流がロード・シミュレータを通して流れなければならない (図 13) ためであ

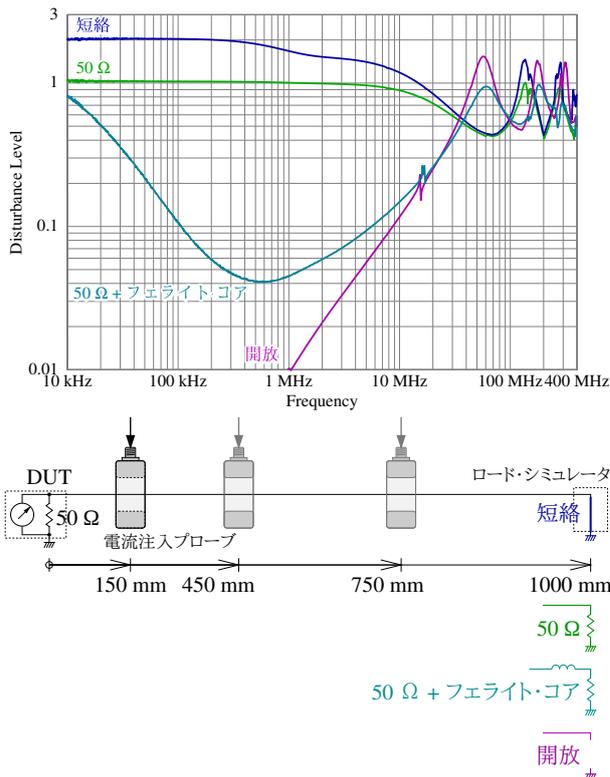


図 27: ロード・シミュレータのインピーダンスの影響 — 電流注入プローブの位置を変えた時の最大値 (実測)

り、ロード・シミュレータを DUT 側から見た時のコモン・モード・インピーダンス (グランド・プレーンとのあいだのインピーダンス) が高い時に実際に生じるであろうことである。<sup>†46</sup>

逆に、テスト・ハーネスのロード・シミュレータ側をグランド・プレーンに短絡した時には、低い周波数でのレベルは高めとなっている。

テスト・ハーネスのロード・シミュレータ側を  $50\ \Omega$  で終端した時は、ハーネスが波長に対して充分に短くなる低い周波数でのレベルは意図した通りとなっている。だが、 $50\ \Omega$  の終端はこの測定でテスト・ハーネスとして用いたワイヤの特性インピーダンス (直径  $1\ \text{mm}$  で  $300\ \Omega$ 、直径  $5\ \text{mm}$  で  $200\ \Omega$  程度と推定される) よりもかなり低いことから、高い周波数でのカーブは短絡の時と幾分似た変動を示している。

$50\ \Omega$  で終端されたテスト・ハーネスのロード・シミュレータ側にフェライト・コアを追加した時、低い周波数範囲 (図 27はこのカーブを見やすくするた

<sup>†46</sup> 実際の試験で、ロード・シミュレータに相当する箇所、ハーネス内の線のあいだに抵抗、LED、スイッチなどが接続されているだけとなっているものを見ることがある。

めに  $10\ \text{kHz}$  からとしているので、中程の周波数範囲となっている) で妨害レベルの大きな低下が見られ、また高い周波数範囲のカーブはロード・シミュレータ側を開放とした時と似たものとなっているが、これは例えばロード・シミュレータが妨害の影響を受けるのを防ごうとしてフェライト・コア (チョーク・コイル) を取り付けた場合などに実際に生じるであろうことである。

これから、電流注入プローブよりもロード・シミュレータ側であっても、テスト・ハーネスに (また、ロード・シミュレータ内の実質的にテスト・ハーネスの一部として振る舞う配線に) フェライト・コアを取り付けるべきでないことが明らかにわかるであろう。<sup>†47</sup>

図 27では電流注入プローブの位置 3 箇所で行った時に観測された妨害レベルの最大値のみを示したが、図 28 で示すように、電流注入プローブの位置を 1 箇所のみで試験した場合にはロード・シミュレータ側のインピーダンスの違いによる高い周波数範囲での妨害レベルの変動は遥かに激しくなる。

BCI 試験で低い周波数の妨害を適切に印加するためにはロード・シミュレータ側のインピーダンスを低く保つことが非常に重要である。

少なくとも ISO 11452-4:2020 では (また、より古い版の ISO 11452-4 でも ISO 11452-1:2015 を参照する場合は) ロード・シミュレータはコモン・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・インピーダンスなどに留意して設計されたものでなければならない (§2.3) ことにも留意すべきである。

ISO 11452-1:2015 にはロード・シミュレータの設計の例も示されており、この話題については [7] でも触れている。

<sup>†47</sup> 実際の試験でテスト・ハーネスのロード・シミュレータ側に、あるいはロード・シミュレータ内の実質的にテスト・ハーネスの一部として振る舞う配線にフェライト・コアが付けられているのを見たことがある。注入デバイスの DUT 側に入っているのではないので試験への悪影響はないだろうと考えたくなるかも知れないが、ここで示したように、それは DUT に注入される妨害のレベルを有意に低下させる可能性がある。ロード・シミュレータやその先に接続される装置への妨害の影響を低減したい場合、§4.2.3 で触れるように、また ISO 11452-1:2015 でロード・シミュレータの設計の例として示されているように、ロード・シミュレータをテスト・ハーネスから見た最初の要素として適切な容量のコンデンサを入れればインピーダンスの上昇とそれに伴う悪影響を低減することができるだろう。

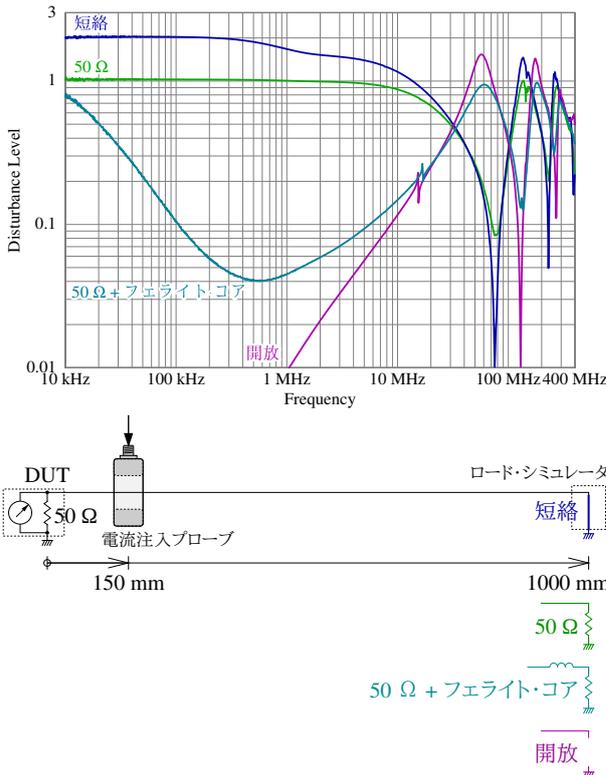


図 28: ロード・シミュレータのインピーダンスの影響 — 電流注入プローブ位置  $d=150\text{mm}$  (実測)

#### 4.2.3 ロード・シミュレータのインピーダンスの影響 — コンデンサの効果 (置換法)

必要な場合、ISO 11452-1:2015<sup>[2]</sup> で示されているようにロード・シミュレータの各端子とグランド・プレーンのあいだにコンデンサを付けることで高周波でのコモン・モード・インピーダンスを下げ、妨害の注入を改善することができるだろう (図 29)。

ISO 11452-1:2015<sup>[2]</sup> では例えばデジタル入出力については  $1\text{ nF}$  のコンデンサの使用が示されており、これは  $1\text{ MHz}$  で  $160\ \Omega$ 、 $20\text{ MHz}$  では  $8\ \Omega$  程度のインピーダンスを与え、 $n$  本のラインを同様に処理すれば全体でのインピーダンスはその  $1/n$  となる。コンデンサの容量を小さくすると効果は低下するが、 $20\text{ MHz}$  (ECE R10.06<sup>[3][4]</sup> でイミュニティ要求が定められている周波数範囲の下限) 程度以上の周波数では  $100\text{ pF}$  でも十分な効果を期待できそうである (図 29)。

高い周波数においてはこれをグランド・プレーンに接続するワイヤの影響も無視できなくなる可能性があるため、ロード・シミュレータの金属の筐体と各端子のあいだにこのようなコンデンサを最小のインピーダンスで接続し (望ましくは筐体に取り付け

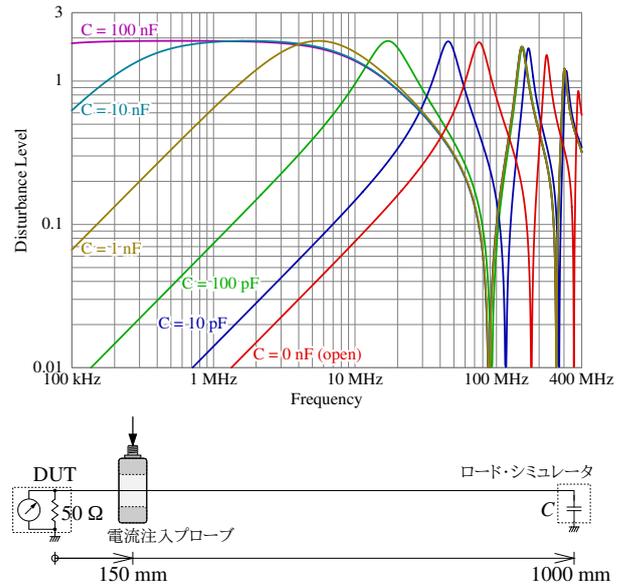


図 29: ロード・シミュレータのインピーダンスの影響 — コンデンサの効果 (シミュレーション)

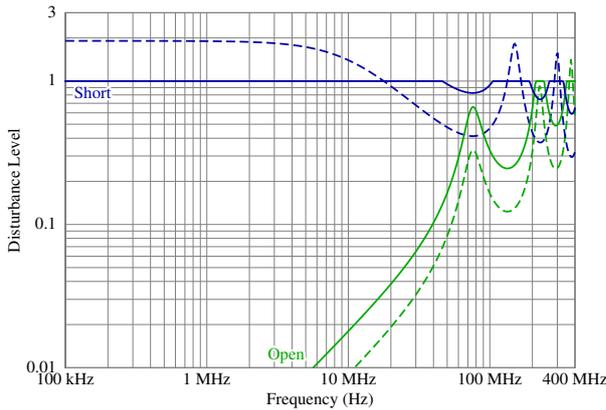
た貫通コンデンサを用い)、その筐体の金属面がグランド・プレーンに直接接触するようにすると良いだろう。

このようなコンデンサはその先に接続された回路や周辺装置とテスト・ハーネスとのあいだにある程度の減結合も与え、その先の回路や周辺装置への妨害の影響を低減する効果、またそれらの DUT への妨害の印加への影響 (§4.2.6, §4.2.7) を低減する効果を与えることも期待できる。

#### 4.2.4 ロード・シミュレータのインピーダンスの影響 (電力制限付き閉ループ法)

電力制限付き閉ループ法を用いた BCI 法で DUT に印加される妨害のレベルをロード・シミュレータ側を短絡とした場合と開放とした場合について推定したものを図 30 に示す。

図 30 では、ロード・シミュレータ側を短絡とした場合、低い周波数範囲では閉ループ法での制御を行なわない場合は DUT に印加される妨害のレベルが高くなっており、高い周波数でも妨害レベルが高くなっている箇所があるが、閉ループ法での制御を行なえばその位置での電流が規定のレベルとなるように制御される。また、高い周波数範囲で DUT に印加される妨害のレベルが低くなっている周波数のうち低下の程度が小さい箇所も閉ループ法での制御を行なえば規定の妨害レベルに合わせられる。だが、



破線は校正で得られた電力を注入した場合、実線は  $k = 4$  として電力制限付き閉ループ法での制御を行なった場合

図 30: 電力制限付き閉ループ法でのロード・シミュレータのインピーダンスの影響 (シミュレーション)

妨害のレベルの低下の程度が大きい箇所は、閉ループ法での制御によって規定の妨害レベルに近付けられてはいるものの規定の妨害レベルに達する前に電力の制限に達するため規定の妨害レベルよりも低いままとなっている。

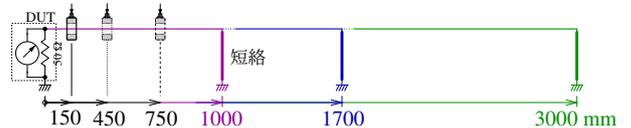
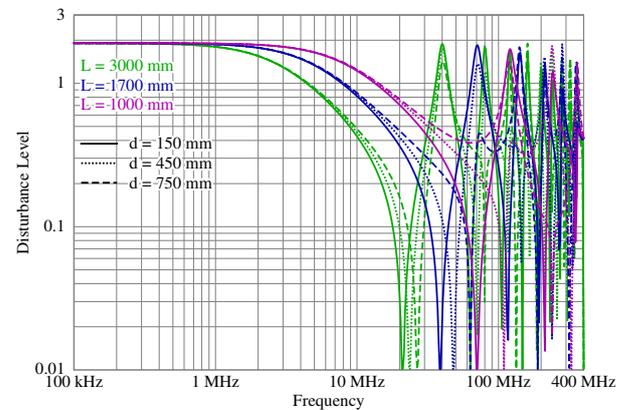
ロード・シミュレータ側を開放とした場合は多くの周波数範囲で DUT に印加される妨害のレベルが著しく低くなっており、電力制限付き閉ループ法での制御によって電流注入プローブに印加される電力が 4 倍 (+6 dB) まで上げられていても多くの周波数範囲で DUT に印加される妨害のレベルは依然として著しく低いままとなっている。図 30 では電力制限付き閉ループ法での制御を行なった時も DUT に印加される妨害のレベルは 10 MHz でも 0.02 (-34 dB) 程度と推定されており、これは置換法 (図 27) の場合の 0.1 (-20 dB) 程度と比べても著しく低い、これは電流注入プローブとロード・シミュレータ側の開放端とのあいだのハーネス長が短いためである。

電力制限付き閉ループ法の場合、DUT の近くでの電流で妨害レベルの制御を行なうことから実際に DUT に印加される妨害のレベルが試験セットアップのインピーダンスに影響されにくくなると期待するかも知れない。だが、電力制限付き閉ループ法は

試験セットアップのインピーダンスが低い時に妨害電流が高くなりすぎないようにすることはできるものの、インピーダンスが高い時に妨害電流が低くなることを防ぐ効果はかなり限定的なものとなる。

#### 4.2.5 テスト・ハーネス長の影響 (置換法)

テスト・ハーネスの長さを 1000 mm、1700 mm、及び 3000 mm とした場合について DUT に印加される妨害のレベルを推定したものを図 31 に示す。これを見れば、テスト・ハーネスの長さも妨害の注入に大きな影響を与えるであろうことがわかるであろう。



テスト・ハーネスの電気的長さは  $L = 1000$  mm の時のカーブを実測値 (図 27) と合わせるように調整した

図 31: テスト・ハーネス長の影響 (シミュレーション)

図 31 の例 (ロード・シミュレータ端を短絡とした条件での推定) では、テスト・ハーネス長が長くなると DUT に印加される妨害のレベルが大きく低下する最も低い周波数が有意に低くなるとともに、電流注入プローブとロード・シミュレータのあいだのハーネス長の変化が小さくなることから電流注入プローブの位置を変えた時の妨害レベルのカーブの変化が小さくなっている。

このため、例えばテスト・ハーネス長を 3000 mm とした時には 23 MHz 付近に電流注入プローブをどの位置としても DUT に印加される妨害のレベルが 0.1 (-20 dB) 程度に低下している箇所が生じている。<sup>†48</sup>

<sup>†48</sup> テスト・ハーネス長を 1700 mm とした場合、3000 mm

長いハーネスを折り返したり蛇行させたりして見掛け上短くして配置したとしても改善は見込めないため、試験への悪影響がないと判断できる場合を除き、規格で規定されたテスト・ハーネス長を厳守すべきであろう。

#### 4.2.6 ロード・シミュレータの先の装置の影響 (置換法)

グラウンド・プレーン上の規定の位置に置かれたロード・シミュレータの先に他の装置 (例えば計測器やコンピュータなど) を接続することも珍しくない。だが、ロード・シミュレータの特性によってはその先に接続された装置やそのケーブルが DUT への妨害の注入に大きな影響を与える可能性もある。

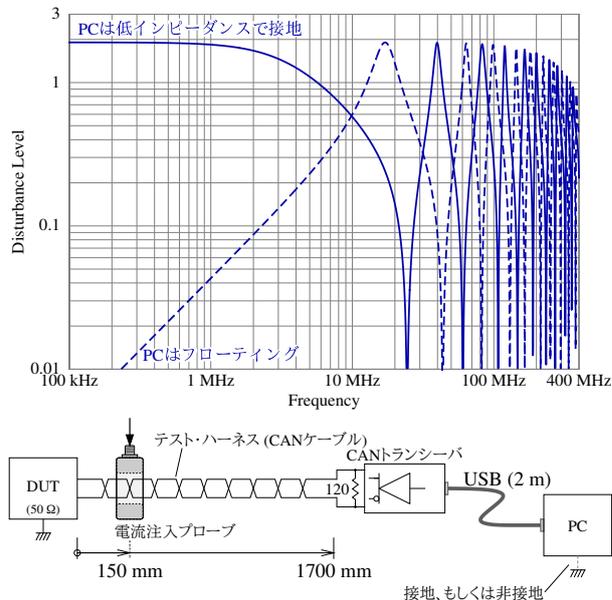


図 32: ロード・シミュレータでインピーダンスを管理しない場合 (シミュレーション)

図 32 は非絶縁の CAN トランシーバの先に PC を接続するような場合を想定したものであるが、ロード・シミュレータ (この例では CAN トランシーバ) の場合ほどではないものの、電流注入プローブを 150 mm、450 mm、及び 750 mm に置いて試験した場合もテスト・ハーネス長 1000 mm の場合よりも明らかに DUT に印加される妨害のレベルが低くなる箇所が生じることが予測される。さらに、ISO 11452-4:2011 以降では電流注入プローブを 450 mm や 750 mm に置いての試験はオプションのような扱いとなっており、試験を電流注入プローブを 150 mm に置いてのみ行った場合は妨害レベルの低下はさらに大きくなる。置換法を用いた BCI 法でのテスト・ハーネス長の  $1000 \pm 100$  mm から  $1700^{+300}_{-0}$  mm への変更は他のいくつかの試験とテスト・ハーネス長を合わせたものと思われるが、その変更の際して電流注入プローブの位置を変えなかった理由、また 450 mm や 750 mm での試験をオプションのような扱いとした理由は理解しにくい。

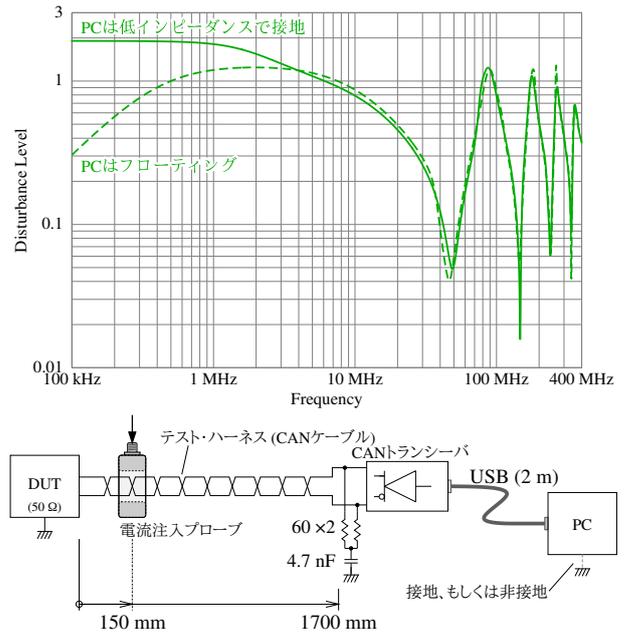


図 33: ロード・シミュレータ (CAN トランシーバ) でインピーダンスを管理した場合 (シミュレーション)

でテスト・ハーネスのコモン・モードの終端インピーダンスを管理しない場合、その先に接続された機器 (この例では PC) の接地の状況によって (また、ここでは考慮していないがトランシーバと PC のあいだや PC の電源のケーブルの長さなどによっても) DUT に印加される妨害レベルが大きく変動することが予想されることが、また低い周波数範囲では妨害が著しく入りにくくなる可能性があることが示されている。

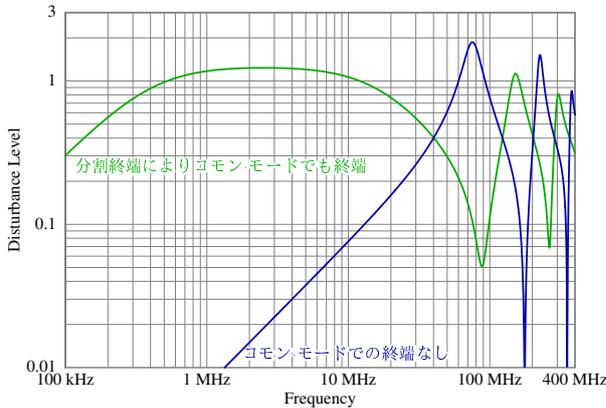
これに対して、図 33 は CAN トランシーバの位置で CAN のラインを分割終端 (ノーマル・モードとコモン・モードの双方での終端となる) した場合を想定したもので、この場合は PC 側の接地の条件による妨害レベルの変動が顕著に小さくなるとともに、PC 側の接地の条件に関わらず低い周波数でも妨害が入るようになっていることがわかるだろう。

この例では分割終端を行なった場合も 1 MHz 程度以下での妨害レベルの低下が見られるが、これはここで分割終端の直列コンデンサとして仮定した容量 (4.7 nF) によるもので、必要な周波数範囲に応じてこの容量を大きくすれば改善できる。

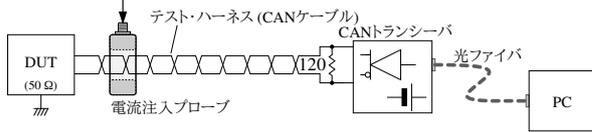
また、高い周波数では依然として大きな変動が見られるが、これは §4.2.1 で述べた要因によるもので、電流注入プローブの位置を変えて試験を繰り返せば緩和できる。

図 32 と図 33 では CAN トランシーバが非絶縁の

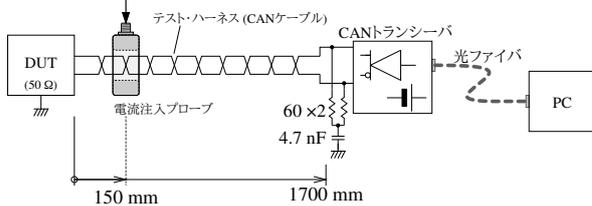
ものであると仮定したが、これが絶縁型の (例えば CAN のライン以外に電気的な接続を持たないバッテリー駆動のもの) 場合、**図 34**で示すように、分割終端などによってコモン・モードでのインピーダンスを下げなければ低い周波数の妨害がさらに入りにくくなることが予期される。



コモン・モードでの終端なし



分割終端によりコモン・モードでも終端



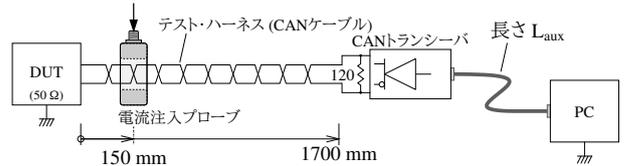
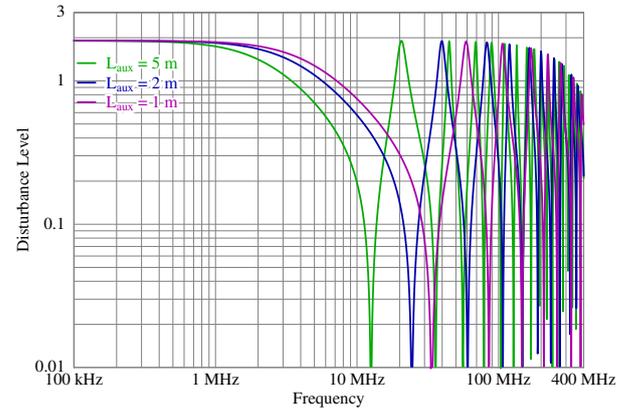
**図 34:** ロード・シミュレータ (CAN トランシーバ) がフローティングの場合 (シミュレーション)

従って、ロード・シミュレータの先に他の装置を接続する場合はロード・シミュレータの位置でインピーダンスをしっかりと管理し、またテスト・ハーネスとその先の装置とのあいだを適切に減結合し、その先に接続されたものが DUT 側から見たインピーダンスに影響しないようにすべきである。

単なる中継ボックスのようなもの、あるいはノーマル・モードでの終端を行なうだけのものではコモン・モード・インピーダンスは管理できず、その先に接続されたケーブルや装置やその接続の状況が妨害の注入に直接影響を与えて試験の結果に予期できない変動をもたらす可能性が、そして妨害が著しく入りにくくなる可能性が予期されるので、そのようなものをロード・シミュレータの位置に置くべきではない。

#### 4.2.7 ロード・シミュレータの先のケーブル長の影響 (置換法)

**図 32**と同様の構成でロード・シミュレータ (非絶縁の CAN トランシーバ) とその先の周辺装置 (PC) とのあいだのケーブルの長さを 1 m、2 m、及び 5 m とした場合の影響を推定したものを**図 35**に示す。



**図 35:** ロード・シミュレータの先のケーブル長の影響 — コモン・モードでの終端なし (シミュレーション)

**図 35**で見られるように、ロード・シミュレータでコモン・モード・インピーダンスの管理と減結合を適切に行っていない場合は実質的にそのケーブルがテスト・ハーネスの一部として振る舞い (例えばテスト・ハーネスが 1.7 m、その先のケーブルが 5 m だった場合、その 6.7 m 全体がテスト・ハーネスであるかのように振る舞い)、その先に接続されたケーブルが DUT への妨害の注入に大きな影響を与えることが予期される。

これに対して、ロード・シミュレータでコモン・モード・インピーダンスの管理と減結合を適切に行なっていれば、**図 36**に示すようにその先のケーブルの影響が大幅に低減されるであろうことがわかる。

#### 4.2.8 DUT の接地ワイヤの影響 (置換法)

**図 37**は、DUT 側の 50 Ω の終端がグランド・プレーンではなく DUT の金属の筐体とのあいだに接続され、その筐体が接地ワイヤでグランド・プレーンに接続されている状態を考え、BCI 法で妨害を印

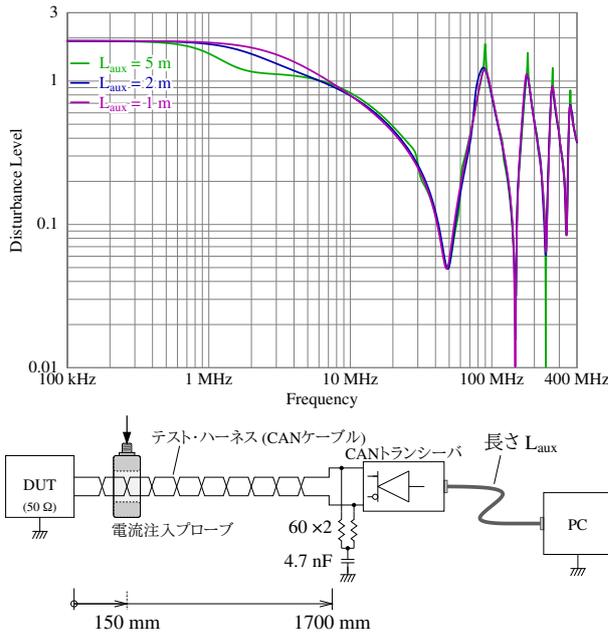


図 36: ロード・シミュレータの先のケーブル長の影響 — 分割終端によりコモン・モードでも終端した場合 (シミュレーション)

加した際に DUT に注入される電流 (あるいは、テスト・ハーネスの DUT 端と DUT の筐体のあいだに誘起する電圧) を推定した結果を示す。

ここでは接地ワイヤとして長さ 150 mm 程度の細いワイヤが用いられた場合を想定してそのインダクタンスを 150 nH と、また比較的小さい DUT を想定して DUT の金属の筐体とグランド・プレーンとのあいだの静電容量を 10 pF と仮定した。また、ロード・シミュレータ側は先の例と同様にグランド・プレーンに短絡されているものとした。

ここで、電流注入プローブの位置と無関係に現れる著しいディップが 130 MHz 近傍に見られるが、ここは 150 nH と 10 pF が並列共振して高インピーダンスを生じているところである。実際の試験でこのような状況となった場合、DUT が接地されているにもかかわらず一部の周波数で DUT のグランド・プレーンに対するインピーダンスが高くなり、妨害電流の流入が妨げられることになる。

また、接地ワイヤのインダクタンスは接地ワイヤの寸法や配置によって変動し、DUT とグランド・プレーンのあいだのキャパシタンスは DUT のグランド・プレーンに対する置き方やそのあいだの絶縁材の誘電率によって変動するので、これらの条件の違いによって共振周波数が変化し、一部の周波数での試験結果の大きな変動を引き起こす可能性もある。

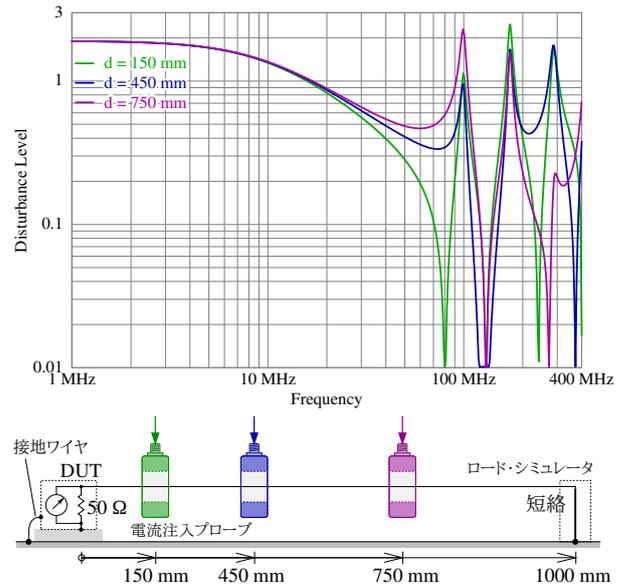


図 37: DUT の接地ワイヤの影響 (シミュレーション)

#### 4.2.9 ハーネスの導体の束ねの影響

妨害の印加の対象となるハーネスは通常は数本から数十本のワイヤを束にしたものとなるが、このようにワイヤを束にしたものに妨害を印加した場合、高い周波数で近接効果のためにその束の内側を引かれたワイヤに妨害電流が流れにくくなり、ハーネスに誘起した妨害電流が束の外側を引かれたワイヤに集中することがある。

これは、簡単には内側のワイヤが外側のワイヤでシールドされるものとして見ることも、あるいは表皮効果によって束の外側に電流が集中するものとして見ることもできるだろう。

ここでは具体的な例は示さないが、[11] では 19 線の束の場合で外側のワイヤと内側のワイヤで注入される電流のレベルに 400 MHz で 30 dB 程度の違いを生じる場合があることが示されている。

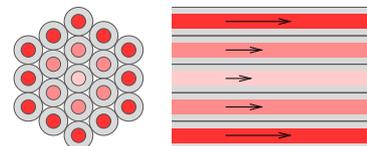


図 38: 密着したワイヤの高周波電流の分布のイメージ

このため、多数のワイヤが密に束ねられている、また妨害の影響を受けやすいかも知れない信号線が他のワイヤ (特に、グランド線や電源線のような接続先のインピーダンスの低いワイヤ) で囲まれているような状況では特に、その束の中のワイヤの並び

方が試験の結果に影響を与えることが、そして高い周波数範囲でのイミュニティ評価が有意に甘くなって束の中でのワイヤの位置が違っていただけで不合格となったかも知れないものを合格と判断することになる可能性があることが予期される。

束の中でのワイヤの配置を意識的に入れ替える<sup>[12]</sup> ようにすればそれぞれのワイヤへの妨害の結合を平準化することもできると思われるが、これは煩雑かも知れない。

少なくとも、実際の設置でそのようにされるのではない限り、近接効果の影響を強めるような引き方、すなわちハーネス内のワイヤを一定の配列で整列させて引くことやワイヤを密着して束ねることを意図的に行なうことは避けた方が無難と思われる。

## 5 参考資料

- [1] ISO 11452-4,
- [1.1] ISO 11452-4:2005, *Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 4: Bulk current injection (BCI)*
- [1.2] ISO 11452-4:2011, *Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 4: Harness excitation methods*
- [1.3] ISO 11452-4:2020, *Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 4: Harness excitation methods*
- [2] ISO 11452-1, *Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 1: General principles and terminology*
- [2.1] ISO 11452-1:2005(+A1:2008)
- [2.2] ISO 11452-1:2015
- [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>
- [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>
- [5.1] ISO 11452 シリーズの概要 — 前編: ECE R10.06 に関する規格
- [5.2] ISO 11452 シリーズの概要 — 後編: その他の試験法 (ISO 11452-4:2011, -7, -8, -9, -10, -11)
- [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] EMC-CS-2010JLR v1.2, *Electromagnetic Compatibility Specification For Electrical/Electronic Components and Subsystems*, Jaguar Land Rover, 2012,  
<http://emc.jaguarlandrover.com.edgesuite.net/docs/requirements.htm>
- [9] 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, 2023,  
<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [10] *EMC test method for coupling into and decoupling from the wiring harness of automotive components in the VHF band*, B. Korber et al., 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE, 2004, DOI: 10.1109/ISEMC.2004.1349953
- [11] *Circuit and Electromagnetic Modeling of Bulk Current Injection Test Setups Involving Complex Wiring Harnesses*, Nicola Toscani et al., 2018, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (Volume: 60, Issue: 6, December 2018), DOI: 10.1109/TEMC.2018.2794823
- [12] *Field-to-Wire Coupling Model for the Common Mode in Random Bundles of Twisted-Wire Pairs*, Giordano Spadacini, 2015, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (Volume: 57, Issue: 5, October 2015), DOI: 10.1109/TEMC.2015.2414356
- [13] *Behavioral Modeling of Tubular Wave Coupler*, F. Grassi et al., 2016, 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), DOI: 10.1109/APEMC.2016.7522846